

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26706005

研究課題名(和文) 酸化物ナノ機能物性の抽出を目指した絶縁性単結晶酸化物ナノワイヤの創成

研究課題名(英文) Synthesis of Insulative Single Crystalline Oxide Nanowires for Extracting Nanoscale Properties of Oxides

研究代表者

長島 一樹 (Kazuki, Nagashima)

九州大学・先導物質化学研究所・准教授

研究者番号：10585988

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,800,000円

研究成果の概要(和文)：自己組織化単結晶酸化物ナノワイヤは、多彩な機能物性や大気・水環境下での安定性、空間選択性、構造自由度を有する魅力的なナノ構造体である。しかし、ナノワイヤ中に高い濃度で存在する意図しないドーパント(不純物・格子欠陥)が酸化物ナノワイヤ本来の機能物性抽出を阻害しており、本研究分野における最も本質的な問題となっていた。本研究では“意図しないドーパント”の形成メカニズムを明らかにし、結晶成長界面の選択性に基づく新たな制御指針の構築に成功した。本研究で得られた結果は、酸化物ナノワイヤ本来の機能物性の抽出・創出を可能にし、酸化物ナノワイヤの基礎科学及び応用展開研究を革新的に発展させる重要な知見である。

研究成果の概要(英文)：Self-assembled single-crystalline metal oxide nanowires are attractive nanomaterials due to their various functionality, stability in air/water, spatially selective growth and designable structure. However, an unintentional doping in metal oxide nanowire has hindered the extraction of intrinsic nature of metal oxide nanowires and therefore it has been a long-standing issue in this research field. In this study, the generation mechanism of such unintentional doping, which is based on two competitive crystal growth interfaces, was successfully clarified and a rational design concept to synthesize the highly crystalline metal oxide nanowires with drastically suppressed unintentional doping was demonstrated for the first time. These findings will pave a way to extract the various fascinating functionalities of metal oxide nanowires towards novel nanodevice applications.

研究分野：ナノ材料科学

キーワード：単結晶酸化物ナノワイヤ 自己組織化 デバイス 界面

1. 研究開始当初の背景

自己組織化単結晶酸化物ナノワイヤは、多彩な機能物性（強誘電性、強磁性、不揮発性メモリ効果など）や大気・水環境下での安定性を有する金属酸化物の特徴と従来ナノ微細加工技術では実現困難な空間選択性と構造自由度を有する自己組織化ナノワイヤの特徴を併せ持った魅力的なナノ構造体である。しかしながら、ナノワイヤ中に高い濃度で存在する意図しないドーパント（不純物・格子欠陥）が酸化物ナノワイヤ本来の機能物性を抽出を阻害しており、本研究分野における最も本質的な問題となっている。例えば、例えば、本来 3eV 以上の大きなバンドギャップを有する絶縁体であるはずの酸化物ナノワイヤにおいて、格子欠陥に由来する電気伝導性が数多く報告されている。上記問題の根本的な解決にはこの“意図しないドーパント”の評価、形成メカニズム解明、及び制御技術が必要不可欠である。本問題の解決は、酸化物ナノワイヤ本来の機能物性の抽出・創出を真に可能にし、酸化物ナノワイヤ研究における基礎科学及び応用展開を革新的に発展させる重要課題である。

2. 研究の目的

本研究では、酸化物ナノワイヤ中の意図しないドーパントの形成メカニズムを解明し、不純物の極めて少ない高結晶性絶縁体酸化物ナノワイヤを創成することで、酸化物ナノワイヤの本来有するナノ機能物性抽出を可能とする基盤技術を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、自己組織化ナノワイヤ成長法の中で最も高い結晶性が期待できる気液固成長法 (Vapor-liquid-solid 法) を用いて単結晶酸化物ナノワイヤを作製した。予め単結晶酸化物基板上に Au 極薄膜を堆積し、真空中で高温加熱することによりナノスケールの金属ドロップレット (液滴) 触媒を形成し、その後パルスレーザー堆積法 (PLD 法) により金属の気相供給を行った。本研究では特に代表的な酸化物半導体である SnO₂、ZnO と等方的な結晶構造を有する MgO に関する単結晶ナノワイヤ構造化を行い、ナノワイヤ成長中の各種条件 (温度・酸素分圧・金属供給フラックス) を系統的に変化させ、酸化物ナノワイヤの形状・結晶性・組成との相関性を検証した。作製したナノワイヤの各種評価は走査電子顕微鏡 (FESEM)、透過電子顕微鏡 (TEM)、エネルギー損失分光 (EELS)、X 線構造解析 (XRD)、紫外可視吸収 (UV-Vis) により行った。

次いで、酸化物ナノワイヤの電気伝導性を評価するために、単一ナノワイヤから成る物性評価用素子をナノ微細加工技術により SiO₂/Si 基板上に作製した。単結晶酸化物基板上に成長したナノワイヤを超音波処理により 2-プロパノール中に分散させ、SiO₂/Si

基板上に展開後、電子線リソグラフィにより Pt ナノ電極間へのポジショニングを行った。その際、1本の酸化物ナノワイヤ内の電気伝導度分布を評価するために、多端子電極による評価素子の作製も併せて行った。作製した単一酸化物ナノワイヤ素子の電子輸送特性評価は真空中で行い、電気伝導度の空間分布をその温度依存性と共に評価した。更に、単結晶酸化物ナノワイヤ形成過程における不純物取り込み効果を原子レベルで解明するために分子動力学シミュレーションによる評価を行った。

4. 研究成果

(1) 単結晶 SnO₂ ナノワイヤの電子輸送特性における結晶成長界面依存性

異なる金属供給フラックス条件により形成した SnO₂ ナノワイヤを作製し電気伝導特性を評価した結果、7桁に及ぶ電気抵抗の差異が観測された。SnO₂ ナノワイヤの形状及び伝導特性の相関性を詳細に検証した結果、単一ナノワイヤ中に伝導性の空間不均一性が存在し、得られた伝導性がナノワイヤ成長中に気固 (Vapor-Solid (VS)) 界面を介して副次的に形成される結晶層 (VS 層) に起因するものであることが明らかとなった。また、電気伝導度の温度依存性から、単一 SnO₂ ナノワイヤ中の電気伝導度が VS 層の影響により絶縁体～金属の範囲で劇的に変化することを見出した。

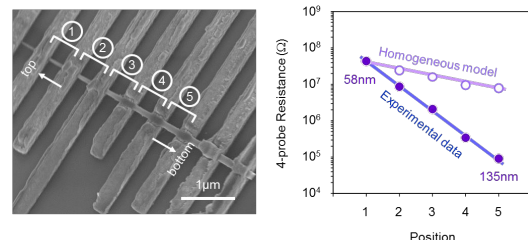


図1 多端子ナノ電極により架橋された単一酸化物ナノワイヤ物性評価素子の FESEM 像 (左) 及び各部位の 4 端子抵抗値 (右)

断面 STEM-EELS 分析の結果、ナノワイヤの中心から表面方向に沿って存在する酸素欠損分布の不均一性が確認され、VS 層における伝導性と酸素欠損との相関性が明らかとなった。本結果を更に検証するため、金属供給フラックス条件を固定し、酸素圧を系統的に変化させた SnO₂ ナノワイヤを作製し、同様の電気伝導性評価を行った。その結果、上記酸素欠損の不均一分布はナノワイヤ作製中の金属：酸素比に依存せず、競合する 2つの結晶成長界面 (Liquid-Solid (LS) 界面・Vapor-Solid 界面) に支配されることが明らかとなった。上記で得られた知見に基づき、VS 界面での結晶成長を完全に抑制した LS 界面のみによるナノワイヤ結晶成長を行うことにより、従来実現が極めて困難であった高い絶縁性を有する SnO₂ ナノワイヤの創成に成功した (~10¹⁴Ωm)。また、断面 STEM-EELS

分析により、作製したナノワイヤは酸素欠損の極めて少ない、均一な化学組成を有する単結晶ナノワイヤであることが分かった。

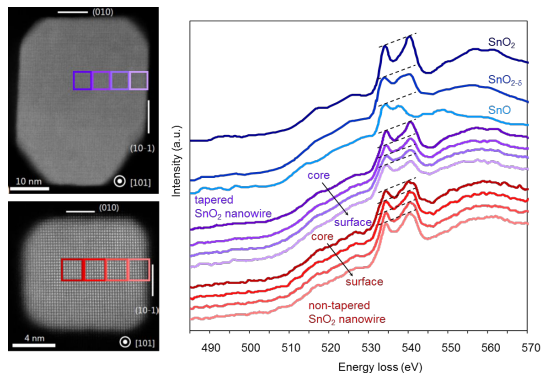


図2 断面 STEM 像：液固界面 + 気固界面におけるナノワイヤ成長（左上） 液固界面のみによるナノワイヤ成長（左下）及び EELS スペクトル（右）

また、上記実験結果に繋がる原理を原子スケールで明らかにするために、分子動力学シミュレーションを行った。LS 界面・VS 界面における結晶成長について検証した結果、LS 界面では VS 界面と比較して結晶成長中に原子の吸着脱離が高い頻度で生じており、エネルギー的に不安定な不純物が排除される“原子アニリング現象”が発生していることが新たに明らかとなった。本研究で得られた一連の結果は、従来未解明であった単結晶酸化物ナノワイヤにおける伝導性の起源の本質に迫る重要な知見であり、酸化物ナノワイヤにおける新機能創出の礎となる極めて有意義な発見である。

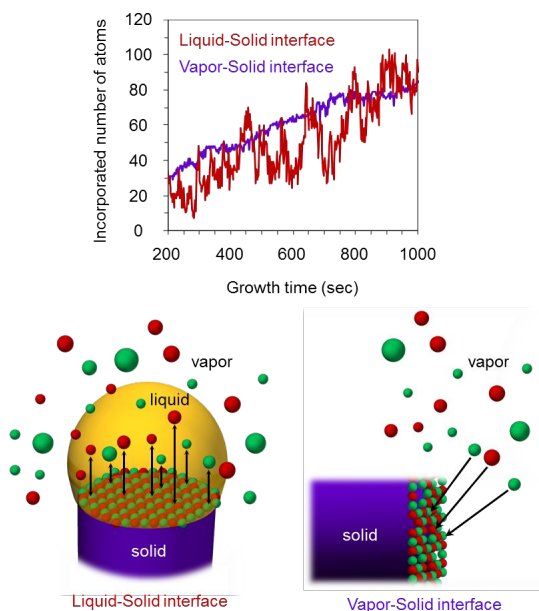


図3 結晶成長界面における原子吸着脱離の分子動力学シミュレーション結果（上）及び各結晶成長界面における原子組み込みイメージ図（下）

(2) 単結晶酸化物ナノワイヤにおける気液

固成長の低温化設計

酸化物ナノワイヤの気液固成長法は、高い結晶性が期待できる一方、その作製温度は 800 程度と極めて高く、他の材料系やデバイスプロセスへの適用は困難であると考えられてきた。そこで本研究では、単結晶酸化物ナノワイヤの気液固成長における低温化設計指針の構築を目指した。気液固ナノワイヤ成長の本質は、液固界面と気固界面を介した結晶成長の競合であり、気固界面での結晶成長を抑制することでナノワイヤ構造化が容易になる。また、気固界面における核形成は酸化物材料の飽和蒸気圧に大きく支配されるため、低温条件下において飽和蒸気圧が下がることがナノワイヤ形成を阻害する原因であると考えられる。実験に先立ち、分子動力学シミュレーションを行った結果、材料供給フラックスを飽和蒸気圧以下で制御することにより、低温条件下においてもナノワイヤ形成が可能であることが分かった。そこで、金属供給フラックス及び酸素圧（酸素供給フラックス）を従来より大幅に低減した条件下で MgO ナノワイヤ作製を行った結果、350 の低温条件下においてもナノワイヤ形成が可能であり、本効果が気固界面での結晶成長抑制効果と強く相関していることを立証した。

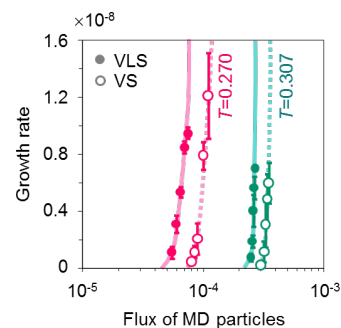


図4 異なる温度条件下における各結晶成長界面（液固界面・気固界面）での結晶成長速度に関する分子動力学シミュレーション結果

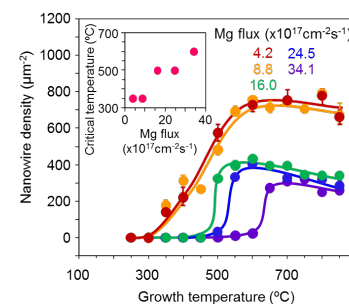


図5 各温度条件・金属供給フラックス条件における MgO ナノワイヤの数密度、及びナノワイヤ形成臨界温度と金属供給フラックスの相関性（挿入図）

次いで、SnO₂ ナノワイヤ及び ZnO ナノワイヤにおいて同様の実験を行った結果、材料供給フラックスの制御によりナノワイヤ成長温度が 400 まで低減され、本研究で提案す

るアプローチの普遍性が立証された。上記結果は、従来条件では適用が困難であった低温性汎用基板材料上でのナノワイヤ成長が可能であることを示唆するものである。そこで、ITO ガラス（耐熱温度 550 程度）及びポリイミド（耐熱温度 400 程度）を用いてナノワイヤ成長に挑戦した結果、これらの基板上で構造が厳密に規定された SnO₂ ナノワイヤ及び ZnO ナノワイヤを作製することに成功した。更に、低温条件で作製された SnO₂ ナノワイヤの結晶性について透過電子顕微鏡、エネルギー損失分光、単一ナノワイヤ素子による電子輸送特性により評価を行った結果、気固界面における結晶成長が抑制されたナノワイヤにおいては、高温条件で作製されたものと同様の高い結晶性を有することが確認された。本研究を通して得られた一連の結果は、高い結晶性を有する単結晶ナノワイヤを低温性基板上でナノデバイス化する新たな応用研究分野を切り拓く可能性のある重要な知見である。

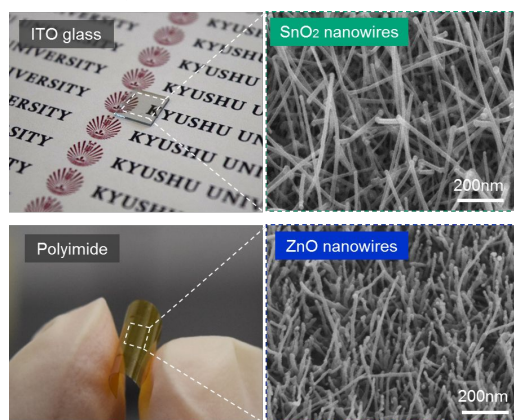


図 6 ITO ガラス基板上に作製した SnO₂ ナノワイヤ（上）及びポリイミド基板上に作製した ZnO ナノワイヤの写真・FESEM 像

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 18 件）

1. G. Meng, T. Yanagida, H. Yoshida, K. Nagashima, M. Kanai, F. W. Zhuge, Y. He, A. Klamchuen, S. Rahong, X. Fang, S. Takeda and T. Kawai, “A flux induced crystal phase transition in the vapor-liquid-solid growth of indium-tin oxide nanowires” *Nanoscale* 6, 7033-7038 (2014) 査読有 DOI: 10.1039/c4nr01016g
2. Y. He, K. Nagashima, M. Kanai, G. Meng, F. W. Zhuge, S. Rahong, X. M. Li, T. Kawai and T. Yanagida, “Nanoscale Size-Selective Deposition of Nanowires by Micrometer Scale Hydrophilic Patterns” *Sci. Rep.* 4, 5943 (2014) 査読有 DOI: 10.1038/srep05943
3. A. Klamchuen, M. Suzuki, K. Nagashima, H. Yoshida, M. Kanai, F. W. Zhuge, Y. He, G. Meng, S. Kai, S. Takeda, T. Kawai and T. Yanagida, “Rational Concept for Designing Vapor-Liquid-Solid Growth of Single Crystalline Metal Oxide Nanowires” *Nano Lett.* 15, 6406-6412 (2015) 査読有 DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b01604
4. G. Meng, F. W. Zhuge, K. Nagashima, A. Nakao, M. Kanai, Y. He, M. Boudot, T. Takahashi, K. Uchida and T. Yanagida, “Nanoscale Thermal Management of Single SnO₂ Nanowire: pico-Joule Energy Consumed Molecule Sensor” *ACS Sens.* 1, 997-1002 (2016) 査読有 DOI: 10.1021/acssensors.6b00364
5. K. Nagashima, H. Yoshida, A. Klamchuen, M. Kanai, G. Meng, F. W. Zhuge, Y. He, H. Anzai, Z. Zhu, M. Suzuki, M. Boudot, S. Takeda and T. Yanagida, “Tailoring Nucleation at Two Interfaces Enables Single Crystalline NiO Nanowires via Vapor-Liquid-Solid Route” *ACS Appl. Mater. Interfaces* 8, 27892-27899 (2016) 査読有 DOI: 10.1021/acsami.6b09761
6. Z. Zhu, M. Suzuki, K. Nagashima, H. Yoshida, M. Kanai, G. Meng, H. Anzai, F. W. Zhuge, Y. He, M. Boudot, S. Takeda and T. Yanagida, “Rational Concept for Reducing Growth Temperature in Vapor-Liquid-Solid Process of Metal Oxide Nanowires” *Nano Lett.* 16, 7495-7502 (2016) 査読有 DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b03227
7. H. Anzai, M. Suzuki, K. Nagashima, M. Kanai, Z. Zhu, Y. He, M. Boudot, G. Zhang, T. Takahashi, K. Kanamoto, T. Seki, N. Shibata and T. Yanagida, “True Vapor-Liquid-Solid Process Suppresses Unintentional Carrier Doping of Single Crystalline Metal Oxide Nanowires” *Nano Lett.* 17, 4698-4705 (2017) 査読有 DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b01362
8. H. Zeng, T. Takahashi, M. Kanai, G. Zhang, Y. He, K. Nagashima and T. Yanagida, “Long-Term Stability of Oxide Nanowire Sensors via Heavily Doped Oxide Contact” *ACS Sens.* 2, 1854-1859 (2017) 査読有 DOI: 10.1021/acssensors.7b00716
9. 柳田 剛, 長島 一樹, “空間選択性に立脚した単結晶金属酸化物ナノワイヤの創製とナノ物性・機能デバイス” *表面化学* 38, 351-356 (2017) 査読無
10. 高橋 綱己, 長島 一樹, 柳田 剛, “単結晶金属酸化物ナノワイヤ分子センサ” *ケミカルエンジニアリング* 62, 798-803

(2017)査読無

11. 柳田 剛, 長島一樹, 高橋 綱己, “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” 応用物理 87, 29-33 (2018)査読無

他 7 件

[学会発表](計 107 件)

1. Anop Klamchuen, 柳田 剛, 長島一樹, 川合 知二, “Rational Concept for Designing Vapor-Liquid-Solid Growth of Metal Oxide Nanowire” 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 北海道, 2014 年 9 月 17 日 ~ 20 日
2. 長島一樹, Gang Meng, Fuwei Zhuge, Yong He, 金井真樹, 柳田 剛, “単結晶ナノワイヤ構造体によるナノ物性探索” 第 2 回アライアンス若手研究交流会, 大阪大学, 大阪, 2014 年 11 月 26 日
3. G. Meng, K. Nagashima, H. Yoshida, M. Kanai, F. W. Zhuge, Y. He, A. Klamchuen, S. Rahong, S. Takeda, T. Kawai and T. Yanagida, “Composition and Crystal Phase Engineering of VLS Nanowires: Impact of Element Nucleation Competitions at Liquid-Solid Interface” Material Research Society Fall Meeting 2014, Boston, USA, 2014.11.30-12.5
4. K. Nagashima, T. Yanagida, M. Kanai and T. Kawai, “A Oxide Nanowire for Probing Nanoscale Memristive Switching” IEEE nano 2015 15th International Conference on Nanotechnology, Rome, Italy, 2015.7.27-30
5. Meng Gang, 長島一樹, 高橋綱己, 内田健, 柳田 剛, “ナノ熱管理工学による低消費エネルギー駆動のナノワイヤセンサ” 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 愛知, 2015 年 9 月 13 日 ~ 16 日
6. H. Anzai, K. Nagashima, G. Meng, F. W. Zhuge and T. Yanagida, “Origin of Electrical Conduction in Single Crystalline Oxide Nanowires” Cross Straits Symposium on Energy and Environmental Science and Technology, Fukuoka, Japan, 2015.12.2-12.3
7. A. Klamchuen, K. Nagashima, M. Suzuki, H. Yoshida, M. Kanai, G. Meng, F. W. Zhuge, Y. He, S. Kai, S. Takeda, T. Kawai and T. Yanagida, “Unveiled experimental design rule for vapor-liquid-solid oxide nanowire growth” The International Chemical Congress of Pacific Basin Society, Hawaii, USA, 2015.12.15-20
8. H. Anzai, K. Nagashima, F. W. Zhuge, G. Meng, T. Seki, N. Shibata, T. Yanagida, “Spatial inhomogeneity of conduction property in single crystalline oxide nanowires” 2016 IMCE International Symposium, Fukuoka, Japan, 2016.1.27
9. K. Nagashima, G. Meng, Y. He, F. W. Zhuge, M. Kanai and T. Yanagida, “Single Crystalline Oxide Nanowires: Rational Design, Post-growth Assembly and Smart Application in Electronics” BIT's 2nd Annual World Congress of Smart Materials-2016, Singapore, 2016.3.4-6
10. 長島一樹, Zetao Zhu, Gang Meng, 金井真樹, 安西宇宙, Fuwei Zhuge, Yong He, 柳田 剛, “Lowering the Growth Temperature of Vapor-liquid-solid Oxide Nanowires” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京, 2016 年 3 月 19 日 ~ 22 日
11. 安西宇宙, 長島一樹, Fuwei Zhuge, Gang Meng, 関 岳人, 柴田直哉, 柳田 剛, “結晶成長界面が決定する単結晶 SnO₂ ナノワイヤの電子輸送特性 - VS 界面对 LS 界面” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京, 2016 年 3 月 19 日 ~ 22 日
12. Gang Meng, 長島一樹, 金井真樹, 柳田 剛, “単結晶酸化物ナノワイヤのナノ熱物性を活用した分子センサ” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京, 2016 年 3 月 19 日 ~ 22 日
13. 安西宇宙, 長島一樹, Zetao Zhu, Gang Meng, 金井真樹, Fuwei Zhuge, Yong He, 関 岳人, 柴田直哉, 柳田 剛, “単結晶酸化物ナノワイヤにおける 2 つの結晶成長界面が有する相反する電子輸送特性” 九州表面・真空研究会 2016, 九州大学筑紫キャンパス, 福岡, 2016 年 6 月 11 日
14. Zetao Zhu, 長島一樹, 鈴木 将, 金井真樹, 柳田 剛, “単結晶酸化物ナノワイヤの VLS 結晶成長における低温化の理論設計指針” 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 新潟, 2016 年 9 月 13 日 ~ 16 日
15. 安西宇宙, 長島一樹, Gang Meng, Fuwei Zhuge, 鐘本勝一, 関 岳人, 柴田直哉, 柳田 剛, “VLS 法を用いた単結晶 SnO₂ ナノワイヤにおける二つの結晶成長界面が決定する組成空間分布と電子輸送特性” 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 新潟, 2016 年 9 月 13 日 ~ 16 日
16. 中村千枝, 長島一樹, Mickaël Boudot, Yong He, Guozhu Zhang, 金井真樹, 柳田 剛, “酸化物ナノワイヤ表面における分子吸脱着現象を介した分子官能基の識別” 第 7 回分子アーキテクトニクス研究

- 会,九州大学, 福岡, 2016年10月20日~21日
17. 井上暉英, 長島一樹, Mickaël Boudot, Yong He, Guozhu Zhang, 金井真樹, 柳田剛, “酸化物ナノワイヤ表面における揮発性有機分子吸着メカニズムの解明” 第7回分子アーキテクトニクス研究会, 九州大学, 福岡, 2016年10月20日~21日
 18. 長島一樹, Gang Meng, Fuwei Zhuge, 金井真樹, 高橋綱己, 内田建, 柳田剛, “ナノスケール熱制御による高感度・超省エネルギー酸化物ナノワイヤセンサ設計” 第4回アライアンス若手交流会~アライアンス(若手)の再考~, 北海道大学, 北海道, 2016年11月9日
 19. K. Nagashima, H. Anzai, D. Sakai, Z. Zhu, A. Inoue, C. Nakamura, A. Klamchuen, M. Suzuki, H. Yoshida, M. Kanai, G. Meng, F. W. Zhuge, Y. He, S. Takeda, T. Kawai and T. Yanagida, “Universal Design Rule for Single Crystalline Oxide Nanowires Growth” 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Kyoto, Japan, 2016.11.8-11
 20. K. Nagashima, Z. Zhu, M. Suzuki, G. Meng, M. Kanai, H. Anzai, F. W. Zhuge, Y. He and T. Yanagida, “Rational Concept for Reducing Growth Temperature of Vapor-Liquid-Solid Metal Oxide Nanowire Growth” Material Research Society Fall Meeting 2016, Boston, USA, 2016.11.27-12.2
 21. 安西宇宙, 長島一樹, 鈴木将, Zetao Zhu, 金井真樹, Yong He, Guozhu Zhang, 鐘本勝一, 関岳人, 柴田直哉, 柳田剛, “固液界面アニール現象を利用した単結晶酸化物ナノワイヤのUnintentional Dopingの劇的抑制と超高純度化の実現” 第64回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川, 2017年3月14日~17日
 22. Yong He, 長島一樹, 高橋綱己, Guozhu Zhang, 金井真樹, 寺尾潤, 内田健, 柳田剛, “単結晶 ZnO ナノワイヤの表面準位を活用した肺がんマーカー分子を超高感度で識別するナノワイヤ FET 分子センサ” 第64回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川, 2017年3月14日~17日
 23. K. Nagashima, Y. He, D. Sakai, A. Inoue, C. Nakamura, M. Suzuki, G. Zhang, T. Takahashi, M. Kanai and T. Yanagida, “Design for Solution based Synthesis of Single Crystalline Metal Oxide Nanowires and Application Towards Molecule Recognition Electronics” 3rd International Conference on Applied Physics and Material

Applications (ICAPMA2017), Pattaya, Thailand, 2017.5.31-6.2

24. 長島一樹, “単結晶酸化物ナノワイヤの構造・組成・物性デザインとナノデバイス展開” 2017年度応用物理学会中国市国支部若手半導体研究会, 愛媛大学城北キャンパス, 愛媛, 2017年7月29日
25. Kazuki Nagashima, Hiroshi Anzai, Zetao Zhu, Hideto Yoshida, Masaru Suzuki, Masaki Kanai, Tsunaki Takahashi, Seiji Takeda and Takeshi Yanagida, “Critical Role of Liquid-Solid Interface on Composition and Electrical Conduction Properties of Vapor-Liquid-Solid Grown Oxide Nanowires” 第36回電子材料シンポジウム, 長浜ロイヤルホテル, 滋賀, 2017年11月8~10日

他 82 件

〔図書〕(計1件)

1. K. Nagashima and T. Yanagida, “Magnetic Nano- and Microwires, Design, Synthesis, Properties and Applications” Woodhead Publishing, Cambridge, 2015, Ch16: Oxide nanowires for non-volatile memory applications pp.489-524

〔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
<https://knagashima.weebly.com/>

6. 研究組織

- (1)研究代表者
長島一樹(NAGASHIMA KAZUKI)
九州大学先端物質化学研究所・准教授
研究者番号:10585988

(2)研究分担者
該当なし

(3)連携研究者
該当なし

(4)研究協力者
吉田秀人(YOSHIDA HIDETO)
大阪大学産業科学研究所・准教授

柴田直哉(SHIBATA NAOYA)
東京大学工学研究科・教授

鐘本勝一(KANEMOTO KATSUICHI)
大阪市立大学理学研究科・准教授