

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00855

研究課題名(和文)半導体・酸化物複合ナノワイヤによる光・電子・スピン工学の融合

研究課題名(英文)Optical, electronic, and spin engineering by semiconductor/oxide composite nanowires

研究代表者

石川 史太郎 (Ishikawa, Fumitaro)

北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授

研究者番号：60456994

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円

研究成果の概要(和文)：分子線エピタキシャル成長による化合物半導体ナノワイヤ成長と、各種酸化物堆積技術との組み合わせにより新しい光・電子・スピン物性が期待される半導体・酸化物複合ナノワイヤを合成した。その中で新奇物性発現が期待される希釈窒化物および希釈ビスマス半導体ナノワイヤを世界に先駆けて合成、その構造および特性について報告した。AlO<sub>x</sub>やTiO<sub>x</sub>を高精度に積層したナノワイヤも得られた。AlO<sub>x</sub>は電子・光閉じ込めに有効な表面保護層として機能し、さらに特徴的な白色発光が得られその応用も検討した。ナノワイヤの大出力化、実用のため2インチのシリコン基板全面で高品質なナノワイヤを均質・大容量で得られる技術も構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

希釈窒化物および希釈ビスマス半導体ナノワイヤの成功は、新しいファイバー通信など赤外帯域の高性能光通信応用光源としての応用が期待できる。半導体・酸化物複合ナノワイヤとして得られた化合物半導体とAlO<sub>x</sub>やTiO<sub>x</sub>を高精度に積層したナノワイヤは、これまでになかった白色光源の実現による照明技術革新や、各種ナノスケール半導体デバイスの高耐久化、高性能化も期待できる。2インチのシリコン基板全面で高品質なナノワイヤを均質・大容量で得られる技術は、太陽電池の高性能化が期待される。いずれも現在普及した半導体デバイス性能の向上や革新を導き、高度情報化社会とグリーンエネルギー社会に資する基盤技術となり得る。

研究成果の概要(英文)：We synthesized semiconductor/oxide composite nanowires by combining molecular beam epitaxial growth of compound semiconductor nanowires with various oxide deposition techniques. The nanowires are expected to have novel optical, electronic, and spin properties. We obtained diluted nitride and diluted bismuth nanowires and reported their properties. By applying various oxidation techniques and oxide deposition techniques to these compound semiconductor nanowires, we have also succeeded in obtaining nanowires in which AlO<sub>x</sub> and TiO<sub>x</sub> are integrated with high precision as semiconductor/oxide composite nanowires. AlO<sub>x</sub> was effective as a surface protective layer for confinement of electrons and light, and on the other hand, we also investigated their characteristic white light emission. Throughout the period, we have succeeded in the growth of large-volume and high quality nanowires on 2 inch Si wafer.

研究分野：半導体ナノ構造結晶成長

キーワード：分子線エピタキシャル成長 ナノワイヤ 化合物半導体 酸化物

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2000年に米国で国家政策(National Nanotechnology Initiative)が開始されて以来、世界各国でナノテクノロジーの先鋭化が進められてきた。当初の計測、エレクトロニクスからその中心を材料開拓へのその中心が移行し、2010年代以降は特に異分野技術の融合と、製品・社会実装を指向したシステム化が進んでいる。[1,2] 欧州連合が開始した Horizon2020 ではナノテクノロジー・先端材料技術を Key Enabling Technology と位置づけ、要素技術の統合化が掲げられている。その中で本研究では、各種物質中でも高い電子素子性能が期待される化合物半導体と、透明導電膜や半導体、光触媒など多様な機能を大気中で安定して発揮する金属酸化物とを複合した新ナノスケール材料によるフォトンクス・エレクトロニクス・スピントロニクスの拡大・融合可能性について探求する。

ナノワイヤは、結晶成長で自己形成される直径数 100nm 以下の 1 次元細線構造である。キャリア輸送を行う極限形状となる一次元体構造や薄膜よりも大きな実効表面積を活用した研究が進展している。[3] 化合物半導体は既存の材料の中で最も高い電子移動度や光電変換効率を有し、トランジスタや LED, レーザー材料として現在の社会に浸透している。金属酸化物は錆や焼き物、化粧品に用いられるような身近にふんだんに存在する材料である。大気中で熱的・化学的に安定であり、イオン結合性と共有結合性が複合した化学結合に由来して多彩な機能を示す。これらは多様な電気・光・磁気的特性を有し、タッチパネルや光触媒といった幅広い用途で用いられる。Si などの異種材料ともナノワイヤであれば微小接触領域からエピタキシャル成長可能で、材料間の融合性を大きく拡大できる [4]。このナノワイヤの特徴を最大限活用すれば、高品質に各種半導体と酸化物がエピタキシャル成長もしくは融合した新しいナノ材料の創出と、その機能発現が期待できる。

### 2. 研究の目的

研究は、高精度の化合物半導体エピタキシャル結晶成長と酸化膜形成技術から新ナノ材料「半導体・酸化物複合ナノワイヤ」を創出し、機能探求とデバイス応用からその有効性を示す。既存の Si テクノロジーとも融合可能な従来の枠組みを超えた光・電子・スピン機能を駆使したデバイス応用に取り組み、情報・通信・エネルギー技術を革新する学術基盤構築を目的として研究を行った。

### 3. 研究の方法

分子線エピタキシャル成長を基盤とした化合物半導体ナノワイヤ結晶成長と、各種酸化物堆積技術との組み合わせによりこれまで探求されることのなかった光・電子・スピン物性が期待される半導体・酸化物複合ナノワイヤを合成した。分子線エピタキシャル成長については、新奇物性発現が期待される希釈窒化物および希釈ビスマス半導体ナノワイヤの合成を行った。希釈窒化物半導体ナノワイヤはその成長温度や成長時供給 V/III 属元素圧力比を詳細に検討し、高品質成長が得られる条件を探求した。さらに同ナノワイヤに Bi を添加することで、格子歪が小さく構造変形の小さな GaNAsBi 高品質結晶ナノワイヤの成長条件を探求した。得られた結晶に対して、フォトルミネッセンス測定や透過型電子顕微鏡観察からその構造、光学特性を調べた。各種酸化技術および酸化物堆積技術をそれら化合物半導体ナノワイヤに応用し、半導体・酸化物複合ナノワイヤとして AlOx や TiOx を高精度に積層したナノワイヤ合成を試みた。期間を通してナノスケールのワイヤの大出力化、実用のための大容量合成にも取り組んだ。

### 4. 研究成果

期間を通して上述の半導体・酸化物複合ナノワイヤの合成と物性把握に取り組み、以下の特に重要となる成果を得ることができた。

(1) GaAs/AlGaOx ヘテロ構造ナノワイヤの大面積化とそれから得られる白色光の特性把握に取り組んだ。自然酸化を用いることでプロセスダメージのない状態でアモルファス AlGaO 最外殻層を GaAs ナノワイヤに形成できること、同 AlGaO が適切に内部 GaAs の光閉じ込め効果を発揮し、発光強度増強効果を得るとともに、年単位でその特性を維持する保護層として有効であることを見出した。さらに、GaAs/高 Al 組成 AlGaAs ヘテロ構造ナノワイヤの大容量成長と酸化条件を最適化することで、紫外域の LED 励起で目視可能な白色蛍光体を得ることができ、その状況をスマートフォンカメラで観察記録することができた。[5]

(2) n 型導電性酸化物として期待できる TiO<sub>2</sub> をスパッタリングにより GaAs ナノワイヤに積層、形成されたワイヤの構造に

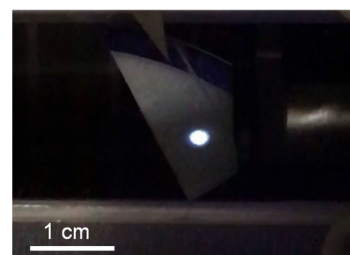


図 1. 365nmLED で励起した目視可能な AlGaOx ナノワイヤからの白色発光，スマートフォンカメラで撮影

ついて調べた。GaAs ナノワイヤ最外殻に TiO をスパッタリングすることで、正確に 10nm 程度で膜厚制御された TiO<sub>2</sub> をコーティングした長さ約 6 μm、直径約 200nm の GaAs/TiO コア-シェル型ナノワイヤが合成できることを確認し、その応用可能性について検討することができた。

(3) 通信光源材料、スピフィルター材料と期待できる GaAs/GaNAsBi/GaAs コア-マルチシェルナノワイヤ構造の形成とそこから室温で通信帯域波長 1.2 μm の発光の観察に成功した。[6] また、同材料の特徴的な結晶構造変形や積層欠陥界面の状態から、特異な Bi 偏析の存在などによる極微細機能性半導体ナノ構造が得られることを見出した。[7, 8] 希釈窒化物半導体 GaNAs ナノワイヤ構造中では閃亜鉛鉱像から六方晶に変化する結晶構造変化が見られ、ナノワイヤ中でそれらが切り替わることにより非線形光学効果に変化する。特に六方晶中では大きな非線形光学定数が得られ、強い二次高調波発生が得られることを報告した。[9]

(4) Si 基板上で合成する GaAs ナノワイヤの大面积・高品質化に取り組んだ。エピレディ表面処理された 2 インチ n 型 Si (111) 基板に対して分子線エピタキシャル成長装置内では成長前処理を簡素な高温熱処理のみとすることで、表面に適切な自然酸化膜が残る状況とした。成長開始時の Ga 供給量を適切に設定し、適切な Vapor-liquid-solid 成長におけるナノワイヤ生成核となる Ga 液滴が基板全体に均質に存在する条件とした。供給 As 分圧をおよそ V/III 比=1 のストイキオメトリーに近い条件化で成長を行うことで、GaAs ナノワイヤが基板全面で均質に形成される条件を得た。さらに上述の AlGaOx 膜をワイヤ最外殻に配置することで、表面が適切に保護され、市販の GaAs 基板と同程度以上の室温発光強度を示すナノワイヤが得られた。同ワイヤからの発光は 2 インチの Si 基板全面で高品質・高強度であり、その GaAs ナノワイヤ総数は基板上で 7 億本程度であった。図 2 は実際に得られた Si 基板上にナノワイヤが形成された試料の外観である。2 インチ基板全面にナノワイヤが形成され、効果的光吸収により表面は黒く観察される。品質も均質なナノワイヤが集積可能になり、そのデバイス応用の展望を得た。[10]

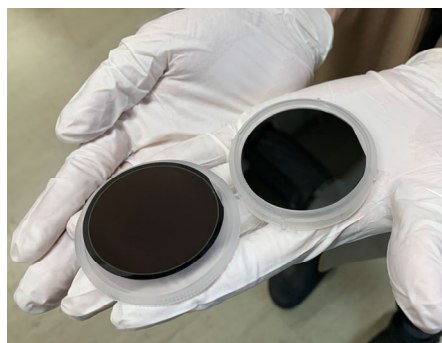


図 2. 2 インチ Si 基板全面で高品質に得られた GaAs/AlGaOx ナノワイヤの外観

(5) ナノワイヤの光学特性、構造特性改善のために、加工基板を用いた選択成長を行った。その結果、従来と 3 倍を超える広い V 属/III 族元素供給比でのナノワイヤ結晶成長が可能であり、適切な条件下では高精度の構造制御と発光特性改善が得られることを見出した。これより、多重量子井戸構造を含む良好な希釈窒素 GaAs 系ナノワイヤの合成に成功し、フェイバー通信帯域、および太陽電池に有効な赤外吸収帯域で動作可能となる展望を得た。

#### <引用文献>

- [1] 研究開発の俯瞰報告書, JST 研究開発戦略センター 2017.
- [2] 荒川泰彦, Nanotech Japan Bulletin 企画特集, 6, 1, 2013.
- [3] S. Gazibegovic et al., Nature 548, 434, 2017.
- [4] K. Tomioka et al., Nature 488, 189, 2012.
- [5] AlGaOx nanowires obtained by wet oxidation as a visible white phosphor under UV-LED illumination, Takeru Tanigawa, Rikuo Tsutsumi, Fumitaro Ishikawa, Jpn. J. Appl. Phys. 61, SD1005, 2022.
- [6] Molecular beam epitaxial growth of GaAs/GaNAsBi core-multishell nanowires, Masahiro Okujima, Kohei Yoshikawa, Shota Mori, Mitsuki Yukimune, Robert D. Richards, Bin Zhang, Weimin M. Chen, Irina A. Buyanova, Fumitaro Ishikawa, Appl. Phys. Express 14, 115002, 2021.
- [7] Twin defect-triggered deformations and Bi segregation in GaAs/GaAsBi core-multishell nanowires, Teruyoshi Matsuda, Kyohei Takada, Kohsuke Yano, Satoshi Shimomura, Yumiko Shimizu, Fumitaro Ishikawa, Appl. Phys. Lett. 117 113105, 2020.
- [8] Controlling Bi Provoked Nanostructure Formation in GaAs/GaAsBi Core-Shell Nanowires, Teruyoshi Matsuda, Kyohei Takada, Kosuke Yano, Rikuo Tsutsumi, Kohei Yoshikawa, Satoshi Shimomura, Yumiko Shimizu, Kazuki Nagashima, Takeshi Yanagida, Fumitaro Ishikawa, Nano Lett. 19, 8510, 2019.
- [9] Anomalously Strong Second-Harmonic Generation in GaAs Nanowires via Crystal-Structure Engineering, Bin Zhang, Jan E. Stehr, Ping-Ping Chen, Xingjun Wang, Fumitaro Ishikawa, Weimin M. Chen, Irina A. Buyanova, Adv. Func. Mater. 31, 2104671, 2021.
- [10] Wafer-scale integration of GaAs/AlGaAs core-shell nanowires on silicon by the single process of self-catalyzed molecular beam epitaxy, Keisuke Minehisa, Ryo Murakami, Hidetoshi Hashimoto, Kaito Nakama, Kenta Sakaguchi, Rikuo Tsutsumi, Takeru Tanigawa, Mitsuki Yukimune, Kazuki Nagashima, Takeshi Yanagida, Shino Sato, Satoshi Hiura, Akihiro Murayama, Fumitaro Ishikawa, Nanoscale Adv. 5, 1651, 2023.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Minehisa Keisuke, Murakami Ryo, Hashimoto Hidetoshi, Nakama Kaito, Sakaguchi Kenta, Tsutsumi Rikuo, Tanigawa Takeru, Yukimune Mitsuki, Nagashima Kazuki, Yanagida Takeshi, Sato Shino, Hiura Satoshi, Murayama Akihiro, Ishikawa Fumitaro	4. 巻 5
2. 論文標題 Wafer-scale integration of GaAs/AlGaAs core/shell nanowires on silicon by the single process of self-catalyzed molecular beam epitaxy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nanoscale Advances	6. 最初と最後の頁 1651 ~ 1663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2na00848c	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 Ueda Osamu, Ikenaga Noriaki, Horita Yukihiro, Takagaki Yuto, Nishiyama Fumitaka, Yukimune Mitsuki, Ishikawa Fumitaro, Tominaga Yoriko	4. 巻 601
2. 論文標題 Structural evaluation of GaAs <sub>1-x</sub> Bi obtained by solid-phase epitaxial growth of amorphous GaAs <sub>1-x</sub> Bi thin films deposited on (0 0 1) GaAs substrates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 126945 ~ 126945
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcrysgro.2022.126945	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 Jansson Mattias, Ishikawa Fumitaro, Chen Weimin M., Buyanova Irina A.	4. 巻 16
2. 論文標題 Designing Semiconductor Nanowires for Efficient Photon Upconversion via Heterostructure Engineering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 12666 ~ 12676
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.2c04287	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 Tanigawa Takeru, Tsutsumi Rikuo, Ishikawa Fumitaro	4. 巻 61
2. 論文標題 AlGa <sub>x</sub> nanowires obtained by wet oxidation as a visible white phosphor under UV-LED illumination	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SD1005 ~ SD1005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac575d	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 Tomnaga Yoriko, Horita Yukihiro, Takagaki Yuto, Nishiyama Fumitaka, Yukimune Mitsuki, Ishikawa Fumitaro	4. 巻 15
2. 論文標題 Crystalline quality of GaAsB grown below 250 °C using molecular beam epitaxy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 045504 ~ 045504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac5ba5	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 Okujima Masahiro, Yoshikawa Kohei, Mori Shota, Yukimune Mitsuki, Richards Robert D., Zhang Bin, Chen Weimin M., Buyanova Irina A., Ishikawa Fumitaro	4. 巻 14
2. 論文標題 Molecular beam epitaxial growth of GaAs/GaNAsBi core-multishell nanowires	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 115002 ~ 115002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac32a7	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 Zhang Bin, Stehr Jan E., Chen Ping Ping, Wang Xingjun, Ishikawa Fumitaro, Chen Weimin M., Buyanova Irina A.	4. 巻 31
2. 論文標題 Anomalous Strong Second Harmonic Generation in GaAs Nanowires via Crystal Structure Engineering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2104671 ~ 2104671
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202104671	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 Okujima Masahiro, Yoshikawa Kohei, Mori Shota, Yukimune Mitsuki, Richards Robert D., Zhang Bin, Chen Weimin M., Buyanova Irina A., Ishikawa Fumitaro	4. 巻 14
2. 論文標題 Molecular beam epitaxial growth of GaAs/GaNAsBi core-multishell nanowires	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 115002 ~ 115002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac32a7	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 Jan Eric Stehr, Roman Balagula, Mattias Jansson, Mitsuki Yukimune, Ryo Fujiwara, Fumitaro Ishikawa, Weimin Chen, Irina A Buyanova	4. 巻 31
2. 論文標題 Effects of growth temperature and thermal annealing on optical quality of GaNAs nanowires emitting in the near-infrared spectral range	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 065702-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5092524	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 Teruyoshi Matsuda, Kyohei Takada, Kosuke Yano, Rikuo Tsutsumi, Kohei Yoshikawa, Satoshi Shimomura, Yumiko Shimizu, Kazuki Nagashima, Takeshi Yanagida, Fumitaro Ishikawa	4. 巻 19
2. 論文標題 Controlling Bi Provoked Nanostructure Formation in GaAs/GaAsBi Core-Shell Nanowires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 8510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b02932	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 石川史太郎	4. 巻 46
2. 論文標題 (総合報告) 薄膜技術応用による化合物半導体ナノワイヤ新材料の開拓	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本結晶成長学会誌	6. 最初と最後の頁 04-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.19009/jjacg.46-2-04	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 T. Matsuda, K. Takada, K. Yano, S. Shimomura, F. Ishikawa	4. 巻 125
2. 論文標題 Strain deformation in GaAs/GaAsBi core-shell nanowire heterostructures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 194301-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5092524	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 Matsuda Teruyoshi, Takada Kyohei, Yano Kohsuke, Shimomura Satoshi, Shimizu Yumiko, Ishikawa Fumitaro	4. 巻 117
2. 論文標題 Twin defect-triggered deformations and Bi segregation in GaAs/GaAsBi core-multishell nanowires	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 113105 ~ 113105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0013094	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 Zhang Bin, Jansson Mattias, Shimizu Yumiko, Chen Weimin M., Ishikawa Fumitaro, Buyanova Irina A.	4. 巻 12
2. 論文標題 Self-assembled nanodisks in coaxial GaAs/GaAsBi/GaAs core-multishell nanowires	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 20849 ~ 20858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0nr05488g	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 Balagula Roman M., Jansson Mattias, Yukimune Mitsuki, Stehr Jan E., Ishikawa Fumitaro, Chen Weimin M., Buyanova Irina A.	4. 巻 10
2. 論文標題 Effects of thermal annealing on localization and strain in core-multishell GaAs/GaNAs/GaAs nanowires	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-64958-6	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63件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 28件)

1. 発表者名 Hidetoshi Hashimoto, Takeru Tanigawa, Keisuke Minehisa, Kaito Nakama, Kazuki Nagashima, Takeshi Yanagida, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 Cylindrical membrane made of enrolled GaAs/AlGaOx core-shell nanowires through the strain deformation of shell oxides
3. 学会等名 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kaito Nakama, Mitsuki Yukimune, Akio Higo, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 Selective Area Molecular Beam Epitaxial Growth of GaAs/GaNAs Core-Multishell Nanowires emitting at 1.2 $\mu\text{m}$ on Silicon (111)
3. 学会等名 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics 2022 (OMN2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Minehisa, Hidetoshi Hashimoto, Kaito Nakama, Takeru Tanigawa, Kento Sakaguchi, Mitsuki Yukimune, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 Molecular beam epitaxy of GaAs-related nanowires over 2-inch Si(111) substrate for large volume nanowires synthesis
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2022 (CSW2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroki Imabayashi, Minato Umeda, Kenji Shiojima, Tatsuya Umenishi, Yoriko Tominaga, Mitsuki Yukimune, Fumitaro Ishikawa, and Osamu Ueda
2. 発表標題 Internal Photoemission Characterization for Low-Temperature-Grown GaAsBi Layers
3. 学会等名 Advanced Metallization Conference 2022, 31st Asian Session (ADMETA plus) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川史太郎
2. 発表標題 MBE研究で続けてきたこと
3. 学会等名 第4回電子材料若手交流会 (ISYSE) 研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 谷川 武瑠, 岡野 昂輝, 石川 史太郎
2. 発表標題 白色蛍光体AlGaOxナノワイヤのラビング処理及びその特性評価
3. 学会等名 第83回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田南斗、梅西達哉、香西優作、富永依里子、行宗詳規、石川史太郎、梶川靖友
2. 発表標題 低温成長GaAs <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> のホッピング伝導機構の解析
3. 学会等名 第83回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Hara, Y. Maeda, A. Kusaba, Y. Kangawa, F. Ishikawa, T. Okuyama
2. 発表標題 Estimation of optimal conditions for semiconductor nanowires by MBE growth using machine learning
3. 学会等名 第41回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Saito, T. Umenishi, M. Harada, Y. Kozai, Y. Tominaga, M. Yukimune, F. Ishikawa, O. Kojima
2. 発表標題 Dependence of optical signal response time on Bi content in low-temperature-grown GaAs <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub>
3. 学会等名 第41回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Minehisa, H. Hashimoto, K. Nakama, T. Tanigawa, K. Sakaguchi, M. Yukimune, F. Ishikawa
2. 発表標題 2 inch Wafer Scale GaAs Nanowires Synthesis by Self-Catalyzed Molecular Beam Epitaxy
3. 学会等名 第41回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Hashimoto, T. Tanigawa, K. Minehisa, K. Nakama, K. Nagashima, T. Yanagida, F. Ishikawa
2. 発表標題 Strain Deformation of GaAs/AlGaOx Core-Shell Nanowires Making Cylindrical Microstructure
3. 学会等名 第41回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Nakama, M. Yukimune, A. Higo, F. Ishikawa
2. 発表標題 GaAs/GaInNAs Core-Multishell Nanowires Arrays Emitting at 1.28 $\mu$ m on Patterned Silicon (111) Grown by Molecular Beam Epitaxy
3. 学会等名 第41回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中間海音, 行宗詳規, 肥後昭男, 石川史太郎
2. 発表標題 加工基板を用いた位置選択 MBE 法によるSi(111)GaAs上ナノワイヤ成長条件の検討
3. 学会等名 第 14 回ナノ構造エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本英季, 峰久恵輔, 中間海音, 谷川武瑠, 長島一樹, 柳田剛, 石川史太郎
2. 発表標題 GaAs/AlGaOxコア-シェルナノワイヤの自然酸化による剥離とシリンドラ形成
3. 学会等名 第 14 回ナノ構造エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 峰久恵輔, 橋本英季, 中間海音, 谷川武瑠, 行宗詳規, 石川史太郎
2. 発表標題 パターン開口Si加工基板を用いたMBE 法によるGaAs 系ナノワイヤ成長条件最適化
3. 学会等名 第 14 回ナノ構造エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本 英季, 峰久 恵輔, 中間 海音, 谷川 武瑠, 長島 一樹, 柳田 剛, 石川 史太郎
2. 発表標題 GaAs/AlGaOxコア-シェルナノワイヤ埋込構造の成長と最外殻シェル層に起因する構造変形
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 峰久 恵輔, 橋本 英季, 中間 海音, 谷川 武瑠, 行宗 詳規, 石川 史太郎
2. 発表標題 MBE法を用いた無加工2インチ Si 基板上 GaInNAs ナノワイヤ成長
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中間 海音, 行宗 詳規, 峰久 恵輔, 肥後 昭男, 石川 史太郎
2. 発表標題 パターン開口Si加工基板を用いたMBE 法によるGaAs 系ナノワイヤ成長条件最適化
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅田皆友、今林弘毅、塩島謙次、梅西達哉、富永依里子、行宗詳規、石川史太郎、上田修
2. 発表標題 低温 MBE 成長 GaAsBi 層の光電評価
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田修、池永訓昭、堀田行紘、高垣佑斗、西山文隆、行宗詳規、石川史太郎、富永依里子
2. 発表標題 (001)GaAs基板上のGaAs <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> 薄膜の構造評価(1) 熱処理した低温成長GaAs <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> 薄膜中の欠陥のTEM評価
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田修、池永訓昭、堀田行紘、高垣佑斗、西山文隆、行宗詳規、石川史太郎、富永依里子
2. 発表標題 (001)GaAs基板上のGaAs <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> 薄膜の構造評価(2) 固相成長したGaAs <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> 薄膜中の欠陥のTEM評価
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoto Danjo, Kenta Sakaguchi, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 Self-Catalyzed Molecular Beam Epitaxial Growth of GaAs nanowires on 2-inch Si(001) wafer
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeru Tanigawa, Rikuo Tsutsumi, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 AlGaOx Nanowires Phosphor Obtained by Wet Oxidation of AlGaAs Providing a White Light Under UV-LED illumination
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Murakami, Mitsuki Yukimune, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 Nucleation mechanism of GaAs nanowires on Si(111) substrates by constituent Ga self-catalyzed molecular beam epitaxy
3. 学会等名 21st International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuto Torigoe, Kohei Yoshikawa, Masahiro Okujima, Syota Mori, Mitsuki Yukimune, Robert D. Richards, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 Molecular Beam Epitaxial Growth of GaAs/GaNAsBi/GaAs Core-Multishell Nanowires
3. 学会等名 21st International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Okujima, Kohei Yoshikawa, Yuto Torigow, Syota Mori, Mitsuki Yukimune, Robert D. Richards, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 Molecular Beam Epitaxial Growth of GaNAsBi Nanowires emitting 1300 nm
3. 学会等名 15th International Conference on Mid-Infrared Optoelectronic Materials and Devices (MIOMD) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Gachter, E. Blundo, M. Yukimune, I. Zardo, F. Ishikawa, A. Polimeni, M. De Luca
2. 発表標題 Bandgap tailoring on demand in GaAs/GaAsN core/shell nanowires by post-growth hydrogenation
3. 学会等名 The 2021 Spring Meeting of the European Materials Research Society (E-MRS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Okujima, Kohei Yoshikawa, Mitsuki Yukimune, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 GaInNAs Nanowires Grown by Molecular Beam Epitaxy Showing Room Temperature Photoluminescence
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Yoshikawa, Masahiro Okujima, Syota Mori, Mitsuki Yukimune, Robert D. Richards, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 Molecular Beam Epitaxial Growth of GaNAsBi Nanowires
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Nadine Gachter, Elena Blundo, Mitsuki Yukimune, Ilaria Zardo, Fumitaro Ishikawa, Antonio Polimeni, Marta De Luca
2 . 発表標題 Defect engineering on demand in GaAsN nanowires by post-growth hydrogen irradiation
3 . 学会等名 APS March Meeting 2021 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 N. Danjo, K. Sakaguchi, F. Ishikawa
2 . 発表標題 Comparison of self-catalyzed molecular beam epitaxial growth of GaAs nanowires on 2-inch Si(001) and Si(111) wafers
3 . 学会等名 40th Electronic Materials Symposium EMS-40
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Tanigawa, R. Tsutsumi and F. Ishikawa
2 . 発表標題 AlGaOx Nanowires Phosphor Providing White Light Obtained by Wet Oxidation of AlGaAs
3 . 学会等名 40th Electronic Materials Symposium EMS-40
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Torigoe, K. Yoshikawa, M. Okujima, S. Mori, M. Yukimune, and F. Ishikawa
2 . 発表標題 GaAs related core-multishell nanowires having GaNAsBi well grown by molecular beam epitaxy
3 . 学会等名 40th Electronic Materials Symposium EMS-40
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 村上 諒, 行宗 詳規, 石川 史太郎
2. 発表標題 分子線エピタキシー法によるSi(111)基板上GaAsナノワイヤ成長における核形成段階の検討
3. 学会等名 第82回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 檀上 直斗, 坂口 健大, 石川 史太郎
2. 発表標題 GaAs/AlリッチAlGaAsコアシェルナノワイヤの自然酸化後の構造特性
3. 学会等名 第82回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷川 武瑠, 堤 陸郎, 石川 史太郎
2. 発表標題 水蒸気酸化で作製した白色蛍光体AlGaOxナノワイヤの発光効率の最適化
3. 学会等名 第82回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳥越 友斗, 吉川 晃平, 奥嶋 正浩, 森 翔太, 行宗 詳規, 石川 史太郎
2. 発表標題 GaAs/GaNAsBi / GaAsコア-マルチシェルナノワイヤの分子線エピタキシャル成長
3. 学会等名 第82回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 M. Yukimune, R. Fujiwara, F. Ishikawa
2. 発表標題 Growth of Dilute Nitride Core-Multishell Heterostructured Nanowires
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ohno, M. Yukimune, R. Fujiwara, Y. Wang, Z. Mi, F. Ishikawa
2. 発表標題 GaAs Nanowires on Si for its application to photoanodes
3. 学会等名 Micro Nano Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Fujiwara, Mitsuki Yukimune, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 Growth of Dilute Nitride Core-Multishell Nanowires
3. 学会等名 7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures, SemiconNano 2019, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoki Tsuda, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 Outermost Native Oxide AlGaOx Shell for GaAs Related Core-Shell Nanowires
3. 学会等名 7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures, SemiconNano 2019, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Teruyoshi Matsuda, Kosuke Yano, Satoshi Shimomura, Yumiko Shimizu, Fumitaro Ishikawa
2 . 発表標題 Bi segregation in GaAs/GaAsBi/GaAs core-multishell nanowires
3 . 学会等名 Nanowire Week 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Yukimune, R. Fujiwara, T. Mita, F. Ishikawa
2 . 発表標題 Polytypism transfer observed in GaAs/GaNAs core-shell nanowires
3 . 学会等名 Nanowire Week 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Mita, R. Fujiwara, M. Yukimune, R. Tsutsumi, F. Ishikawa
2 . 発表標題 Molecular beam epitaxial growth of various diluted nitride nanowires
3 . 学会等名 Nanowire Week 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tomoki Ohno, Mitsuki Yukimune, Ryo Fujiwara, Kazuki Nagashima, Takeshi Yanagida, Fumitaro Ishikawa
2 . 発表標題 Synthesis of GaAs/TiO <sub>2</sub> composite nanowires
3 . 学会等名 Nanowire Week 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Tsutsumi, N. Tsuda, B. Zhang, W. M. Chen, I. A. Buyanova, F. Ishikawa
2. 発表標題 Characteristics of GaAs/AlGaAs core-multishell structures having native oxide AlGaO Outermost shell
3. 学会等名 Nanowire Week 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Tsutsumi, N. Tsuda, F. Ishikawa
2. 発表標題 GaAs/AlGaAs Core-Multishell Structure Covered by Native oxide AlGaOx
3. 学会等名 2019 international conference on solid state devices and materials SSDM (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Teruyoshi Matsuda, Kosuke Yano, Satoshi Shimomura, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題 Bi localization in GaAs/GaAsBi/GaAs heterostructured nanowires
3. 学会等名 The 10th International Workshop on Bismuth-Containing Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mitsuki Yukimune, Ryo Fujiwara, Fumitaro Ishikawa, Shula Chen, Mattias Jansson, Weimin M. Chen, Irina A. Buyanova
2. 発表標題 Dilute Nitride GaNAs Nanowires for Optoelectronics” Growth of GaAs/GaNAs/GaAs Core-Multishell Nanowires Lasing at 1micro-m
3. 学会等名 EDISON 21; The 21st International Conference Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Teruyuki Matsuda, Kosuke Yano, Satoshi Shimomura, Fumitaro Ishikawa
2 . 発表標題 GaAs/GaAsBi Core-Multishell Nanowires Forming Quantum Confined Structure
3 . 学会等名 EDISON 21; The 21st International Conference Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Mitsuki Yukimune, Ryo Fujiwara, Fumitaro Ishikawa, Shula Chen, Weimin M. Chen, Irina A. Buyanova
2 . 発表標題 Growth of GaAs/GaNAs/GaAs Core-Multishell Nanowires Lasing at 1micro-m
3 . 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019, (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Takaya Mita, Ryo Fujiwara, Mitsuki Yukimune, Fumitaro Ishikawa
2 . 発表標題 Crystal structures of GaAs/GaNAs core-multishell nanowires
3 . 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019, (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Mori, M. Yukimune, R. Fujiwara and F. Ishikawa
2 . 発表標題 GaNAsBi heterostructure nanowires showing zinclblende and wurtzite related x-ray diffraction peaks
3 . 学会等名 38th Electronic Materials Symposium EMS-38
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Tsutsumi, N. Tsuda and F. Ishikawa
2. 発表標題 Characteristics of GaAs related multi-shell nanowires surrounded by native oxide AlGaOx layer
3. 学会等名 38th Electronic Materials Symposium EMS-38
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ohno, M. Yukimune, R. Fujiwara, Y. Wang, Z. Mi and F. Ishikawa
2. 発表標題 Photoanode measurement of GaAs nanowires grown on silicon substrates
3. 学会等名 38th Electronic Materials Symposium EMS-38
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 美田 貴也, 藤原 亮, 行宗 詳規, 石川 史太郎
2. 発表標題 X線回折によるGaAs系コア-マルチシェルナノワイヤの構造解析
3. 学会等名 2019年度 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉川 晃平, 松田 晃賢, 下村 哲, 石川 史太郎, 長島 一樹, 柳田 剛
2. 発表標題 Bi導入で引き起こされるGaAs/GaAsBiヘテロ構造ナノワイヤの構造変形
3. 学会等名 2019年度 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 行宗 詳規, 藤原 亮, 美田 貴也, 石川 史太郎
2. 発表標題 Ga照射表面処理によるナノワイヤの成長方向制御
3. 学会等名 2019年度 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森翔太, 行宗詳規, 藤原亮, 石川史太郎
2. 発表標題 MBE による GaAs/GaAsNbi ヘテロ構造ナノワイヤ成長
3. 学会等名 2019年度 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大野 智樹, 石川 史太郎, 長島 一樹, 柳田 剛
2. 発表標題 分子線エピタキシャル成長GaAsナノワイヤへのTiO <sub>2</sub> コーティング
3. 学会等名 2019年度 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堤 陸朗, 津田 眞, 石川 史太郎
2. 発表標題 最外殻に自然酸化膜 AlGaO <sub>x</sub> を持つ GaAs/AlGaAs コアマルチシェル型ナノワイヤの特性
3. 学会等名 2019年度 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤原 亮, 行宗 詳規, 石川 史太郎
2. 発表標題 GaAsナノワイヤの窒素導入量による結晶欠陥の変化
3. 学会等名 2019年度 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森翔太, 行宗詳規, 藤原亮, 石川史太郎
2. 発表標題 GaAsNBiナノワイヤの分子線エピタキシャル成長
3. 学会等名 2019年度 日本金属学会秋期講演大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター <a href="https://www.rciqe.hokudai.ac.jp/">https://www.rciqe.hokudai.ac.jp/</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	村山 明宏  (Murayama Akihiro)  (00333906)	北海道大学・情報科学研究院・教授    (10101)	

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
研究分担者	長島 一樹  (Nagashima Kazuki)  (10585988)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授    (12601)	

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			
スウェーデン	Linkoping University			
米国	Michigan University			