

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02573

研究課題名(和文) 次世代スマートデバイスに向けた新材料半導体ナノワイヤ発光素子の要素技術開発

研究課題名(英文) Research and development on novel-semiconductor nanowire light emitting devices towards next-generation smart devices

研究代表者

館林 潤 (Tatebayashi, Jun)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40558805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：超スマート社会実現に向けワイドギャップ化合物半導体(窒化物半導体・酸化亜鉛を対象とする)のナノワイヤの成長技術および発光層として希土類添加層をナノワイヤ上に形成する成膜技術確立するとともに光学・構造特性を評価し物理物性の理解を図った。加工物半導体ナノワイヤ上に高効率で発光する希土類添加半導体膜を成膜する技術確立するとともに、成長条件を最適化することにより従来の膜構造に比して遜色ない室温赤色発光の観測に成功した。加えて、電流注入技術や窒化物半導体ナノワイヤをフレキシブル樹脂であるポリジメチルシロキサンに埋込み室温赤色発光を実現するためのプロセス技術確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は超スマート社会実現に向けた新材料半導体ナノワイヤ発光素子の要素技術開発として、デバイス素子を飛躍的に小型化でき可視光で動作可能なワイドギャップ半導体ナノワイヤ構造に注目し、本構造に機能性材料である希土類添加半導体を組み合わせる研究課題である。本研究を通じて極めて色純度の高く発光波長がぶれない赤色発光するナノワイヤ構造の実現に成功するだけでなく、電流注入構造やフレキシブル基板への転写技術を開発する等、無機半導体をベースにしたフレキシブルなスマートデバイス実現に向けた要素技術は確立したと言え、極めて学術的・社会的意義は高い。

研究成果の概要(英文)：In order to realize a super smart society, we established the growth technology of nanowires based on wide-gap compound semiconductors (nitride semiconductors and zinc oxide) and the technology to form rare-earth-doped films on the core nanowires. We also studied optical and structural characteristics to understand detailed physics of the fabricated nanowire materials. In addition to establishing a technology for forming rare earth-doped semiconductor films on the nanowires with high efficiency, we have succeeded in observing room temperature red luminescence which is comparable to conventional film structures by optimizing growth conditions. In addition, we have established current injection technology and process technology to realize room temperature red luminescence by embedding nitride semiconductor nanowires in polydimethylsiloxane, a flexible resin.

研究分野：半導体ナノ構造

キーワード：ナノワイヤ 有機金属気相エピタキシャル法 希土類添加半導体 赤色LED フレキシブルデバイス

## 1. 研究開始当初の背景

高度情報化社会の現代社会において、半導体光デバイスは生活の様々な場面で根幹となる必要不可欠な科学技術となっている。かつて半導体の活躍する場は人体まで数 km から数 m 程度の「身の回り」の距離であったが、近年のスマートフォン等のモバイル端末に代表されるようにその距離は持ち歩ける程度（数 m から数 cm）に近づいた。今後普及すると予測されるスマートデバイスは人体から更に近く、数 cm 以下の領域で動作するようになる。例えば血糖値センサーに代表される環境・生体センシングデバイスは皮膚上に直接貼り付けて使用されるようになり、網膜ディスプレイ等のヘッドマウントディスプレイに代表される拡張現実デバイスは将来更に進化を遂げ、生活の様々な場面のみならず医療・軍事分野において必要な情報が現実空間と重なって直ぐに取り出せるようになる時代は来つつある。科学技術基本計画『ソサエティー5.0』でも策定されている「超スマート社会」到来に向け、次世代スマートデバイス実現のための半導体光デバイスの更なる小型化・高性能化及び多機能化は必要不可欠である。現在微小レーザ光源として様々なアプローチ（フォトリソグラフィ・マイクロディスク等）が研究されているが、中でも近年ナノワイヤを用いたナノレーザが注目を集めている。これは直径数百 nm、長さ数 $\mu\text{m}$  程度の半導体微細構造であるナノワイヤを共振器とした光源であり、径方向は空気-半導体間の大きな屈折率差により光が閉じ込められる一方、軸方向（導波方向）はナノワイヤの両端面を反射鏡としたファブリ・ペロー共振器を構成し軸方向にほぼ直線に出力され、従来の半導体レーザと同様のデバイス物理で動作しながら遥かに小さいモード体積でレーザ発振が可能である。またボトムアップ的手法で成長することから従来のトップダウン的手法により作製された微小レーザ光源に比べて加工損傷が抑制されるだけでなく、径・軸の二方向に結晶成長が可能であることから、従来の一次元層成長に比べ自由度の高い構造設計が可能であることが特徴である。

一方、地球規模の省エネなど環境対策に貢献するエコデバイスとして窒化物半導体が脚光を浴びている。将来の超スマート社会に向け、携帯端末に搭載可能な超小型発光ダイオード（Light Emitting Diode: LED）を用いたプロジェクターやヘッドマウントディスプレイに応用可能な超小型・高精細発光素子材料開発に対する社会的要請が高まっている。ここで鍵となる技術は「如何に3原色超小型 LED 素子を同一基板上に実現するか」であるが、近年これを実現する材料として希土類添加窒化物半導体が注目を集めている。これは、従来の伝導体・価電子帯間遷移を利用した発光原理とは全く異なる希土類元素特有の 4f 殻内遷移を用いた発光機能を有し、非常に狭い発光線幅且つ発光波長が温度に対して殆ど依存しないことが特徴である。これらの特色は将来色純度の極めて高い超高精細ディスプレイを実現するうえで必要不可欠なデバイス性能である。我々のグループは窒化ガリウム（GaN）に赤色蛍光材料である希土類元素ユーロピウム（Europium: Eu）を添加した GaN:Eu を発光層に用いた LED の動作実証に世界で初めて成功した。近年その光出力は 1mW を超え実用化に向け遜色ない性能が得られている。現在更なる高出力化・高性能化に向け(i)希土類添加濃度及び活性化率増大、(ii) ツリウム（Tm：青色蛍光材料）やテルビウム（Tb:緑色蛍光材料）等新材料希土類半導体への展開に加え、(iii)微小共振器やナノ構造を用いたフォトン場制御による発光遷移確率増大と素子の小型化、について研究を進めているところである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、次世代スマートデバイス実現に向けた基盤要素技術として、可視光領域で動作するワイドギャップ化合物半導体（窒化物半導体(GaN)および酸化亜鉛(ZnO)) ナノワイヤの結晶成長技術を確認するとともに、ナノワイヤに希土類を添加する結晶成長技術を確認し、光学特性及び構造評価を通じその物理物性を深めることを目的とする。ナノワイヤ構造は、光デバイスを飛躍的に小型化するための革新的基盤技術となり得るが、ナノワイヤ構造の発光層として希土類添加半導体を用いる理由は大きく二つある。一つは、化合物半導体中の希土類元素の高濃度化である。希土類添加窒化物半導体系 LED の現在の大きな課題

である高輝度化において Eu の高濃度化は必須であるが、従来の窒化物半導体上 GaN:Eu 膜の層成長においては、Eu の高濃度化に伴う結晶性悪化が問題であった。主な原因として希土類元素が添加されることによる格子不整合が挙げられる。ナノワイヤ構造は極めて細い擬 1 次元結晶であり基板との接触面積が小さく格子不整合を無視することが出来るため、従来の薄膜成長では実現困難であった新規構造・材料組成を組み合わせた結晶成長が可能であることが知られている。このことから、通常の薄膜成長よりも結晶の品質を損なうことなく高濃度の Eu を GaN ナノワイヤに添加することも可能である。加えて、ナノワイヤ構造にすると濃度消光の抑制が可能であるとの報告もなされており、LED の高輝度化が期待できる。もう一つは均一に発光材料が添加できる点である。希土類添加半導体は均一に結晶成長できることから、従来の量子構造のような緻密な結晶成長制御を行う必要も無く極めて色純度の高い発光を得ることも可能である。よって本研究を遂行する上での学術的な独自性及び意義は非常に高い。

本研究課題は、高性能（高信頼性・高速動作・長寿命）及び小型化等無機半導体の持つ大きな強みを生かし、次世代スマートデバイス実現に向け光デバイスの更なるダウンスケールリングを図るべくナノワイヤ研究を遂行するだけでなく、新材料（希土類添加半導体）を用い高性能・多機能化を目論むものである。その結果、ナノワイヤー本が一発光素子として機能することから従来のディスプレイの飛躍的な微細化が可能であり、アレイ化することにより次世代スマートデバイスである拡張現実デバイス用微小光源として有用である。本研究課題が遂行・深化することにより、将来的にはナノワイヤ光源を眼鏡やコンタクトレンズに埋め込んだ究極的極小ディスプレイデバイスの実現を目指す。本研究の成果はナノワイヤ光デバイス及び窒化物 LED 技術において新たなパラダイムシフトを巻き起こす可能性があるだけでなく、新機能ナノ光デバイス実証の中で新しいデバイス物理が生まれ、数多くの知的資産が産出されることが期待される。

### 3. 研究の方法

本研究では上記研究構想を達成する上での要素技術を構築するために、ZnO および GaN の二つのワイドギャップ材料に注目しそれぞれナノワイヤの結晶成長技術を確立するとともに、ナノワイヤへの希土類添加を試み光学・構造的性質の探究を行った。ZnO ナノワイヤについては、ジエチルジンク (DEZn) と酸素を原料とした MOCVD 法によりサファイア (0001) 基板上に ZnO ナノワイヤを成長させた。ナノワイヤ成長後 ZnO 成長中に基板上部で希土類酸化物 (Tm, Yb および Eu) 混合ターゲットを RF スパッタリングすることにより ZnO ナノワイヤ構造上に希土類添加 ZnO 膜を成膜した。GaN ナノワイヤについてはサファイア基板上に GaN バッファ層を成長した基板を用意しその上に酸化シリコンを蒸着した後 EB 描画装置により円状 2 次元パターンを施し、その上に GaN ナノワイヤの結晶成長を行った。まずは、温度や VI/II 比 (ZnO) および V/III (GaN) 比、成長速度等の成長条件依存性を詳細に調べることでナノワイヤの成長メカニズムを解明し高均一化・高品質化を目指した。作製したサンプルについて様々な光学・構造評価を行った。まず、成長したナノワイヤの形状観察には走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM) を用いた。希土類のイオン濃度の同定にはエネルギー分散型 X 線分析 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDX) を用いた。光学特性については、サンプルをクライオスタット内にマウントして 10K まで冷却してフォトルミネッセンス (Photoluminescence: PL) 測定を行った。PL 測定には電子冷却の Si フォトダイオードアレイと 75 cm 分光器を用い分光測定を行った。サンプルの励起光源として 2 種類の励起レーザを用いた。一つは He-Cd レーザ (発振波長 325 nm) で、母体材料を励起し生成された電子が希土類添加により生じたトラップ準位に捕獲され、オージェ過程などによるエネルギー輸送を介して希土類原子の 4f 殻内電子を励起 (間接励起) することが可能である。もう一つは Ar レーザ (発振波長 457, 488 および 514 nm) であり、基底準位から励起準位のエネルギー差に相当するエネルギーを励起レーザにより与えることで、希土類原子の 4f 殻内電子を励起 (直接励起) することが可能である。希土類原子の発光寿命測定には検出器として Si アバランシェフォトダイオードを搭載した 50 cm 分光器、

励起レーザとして音響光学素子によって変調した He-Cd レーザを用いた。さらに、ナノワイヤの構造や発光特性を詳細に評価するため、断面透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscopy: TEM) やカソードルミネッセンス法 (Cathodoluminescence: CL) を用いた。

#### 4. 研究成果

今回の研究助成で得られた成果を以下に列挙する。

##### I. Eu 添加 ZnO ナノワイヤの結晶成長と Eu 発光特性評価

ZnO ナノワイヤ構造を成長後、ZnO 成長中に基板上部で Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 焼結ターゲットを RF スパッタリングすることにより ZnO:Eu 膜を成長し、ZnO:Eu/ZnO ナノワイヤ構造を実現した (図 1 (a))。SEM によることによって表面・断面観察の結果、直径 50 nm 程度の高密度 ZnO ナノワイヤ ( $1.25 \times 10^8$  本/cm<sup>2</sup>) 上にマッチ棒状の ZnO:Eu/ZnO ナノワイヤ構造の形成が確認された (図 1 (b))。成長後、O<sub>2</sub> 雰囲気下にて 30 分間の熱処理を施した試料に対して、室温 PL 測定を行った結果、薄膜構造試料 (ZnO:Eu/sapphire 基板) および ZnO 薄膜バッファ層試料 (ZnO:Eu/ZnO 膜) と比して 613 nm 付近にて Eu<sup>3+</sup>由来の赤色発光の強度増大が確認された (図 1 (c))。この結果は、ZnO:Eu 膜成長においてバッファ層としてナノワイヤ構造を用いる優位性を示唆するものである。

##### II. Tm, Yb 共添加 ZnO ナノワイヤにおける希土類イオン間エネルギー輸送機構の解明

研究成果 I と同様の方法により ZnO ナノワイヤ成長後、ZnO 成膜中に基板上部で濃度比の異なる Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混合焼結ターゲットを RF スパッタリングすることにより量子切断蛍光体である Tm, Yb を共添加した ZnO ナノワイヤ構造を作製した (図 2 (a)(b))。作製したサンプルについて低温 (10 K) で PL 測定を行った。ZnO 母体励起による PL 測定の結果 (図 2 (c)) より、濃度比の異なる全てのサンプルにおいて 487 および 798 nm 近傍にそれぞれ <sup>1</sup>G<sub>4</sub> → <sup>3</sup>H<sub>6</sub>, <sup>3</sup>H<sub>6</sub> → <sup>3</sup>H<sub>6</sub> 遷移に起因する Tm<sup>3+</sup> 発光、980 nm 近傍に <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> → <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> 遷移に起因する Yb<sup>3+</sup> 発光が観測された。共添加膜中の Yb<sup>3+</sup> 濃度比が高いサンプルにおいて Tm<sup>3+</sup> 発光は弱くなる一方、Yb<sup>3+</sup> 発光は強まる傾向が観測された (図 2 (d))。これは、Tm<sup>3+</sup> から Yb<sup>3+</sup> へのエネルギー輸送プロセスが効率的に起きているためであり、量子切断に必要なエネルギー輸送プロセスは共添加膜中の濃度比を変えることにより制御可能であることを示すものである。次に、Tm<sup>3+</sup> の <sup>3</sup>H<sub>6</sub> → <sup>1</sup>G<sub>4</sub> 遷移の直接励起による PL 測定の結果 (図 2 (e)) より、Yb のピーク群のうち一部のピークが直接励起によって励起されていることが判明した。このうち、978 nm の発光は Tm の 488 nm 発光エネルギーの半分に近い値となっており、量子切断の観点からエネルギー整合している。このことから本ピークは希土類間のエネルギー輸送が支配的に起きている発光センターであると考えられる。

##### III. Eu 添加 GaN コアシェルナノワイヤの結晶成長と光学・構造評価およびフレキシブル樹脂への転写

図 3 (a)-(d) に成長した GaN:Eu/GaN コアシェルナノワイヤ構造の SEM 像および断面 TEM 像を示す。コア・シェル層の各々の成長条件を最適化することで GaN:Eu/GaN コアシェルナノワイヤ構造の OMVPE 法を用いた作製に成功した。特に GaN:Eu シェル層の V/III 比と成長温度は最適化の際に重要なパラメーターであり、適度に高い V/III 比 (1400) と成長温度 (1050°C) で成長することにより高品質・高輝度な GaN:Eu/GaN コアシェルナノワイヤ構造の作製に成功した。断面 TEM 評価により作製されたナノワイヤは c 軸方向に配向されているとともに、ナノワイヤ側壁が複数の結晶面を有することが判明した (図 3 (c,d))。図 3 (e) に GaN:Eu ナノワイヤ構造の 10K における PL スペクトルを示す。同一条件で成長した GaN:Eu 膜と比較して GaN:Eu ナノワイヤ構造から強い Eu 発光が観測された。スペクトル形状や発光ピーク波長の違いから、ナノワイヤ構造中の Eu イオンは膜構造と異なり、発光効率の高い発光中心 (OMVPE7) の形状と酷似しており、膜構造より OMVPE7 の発光が優位であると考えられる。本発光中心は電流注入において有利とされており、光取出し効率の向上も相俟って電流注入デバイス応用時の発光効率の改善も期待される。また、上部から測

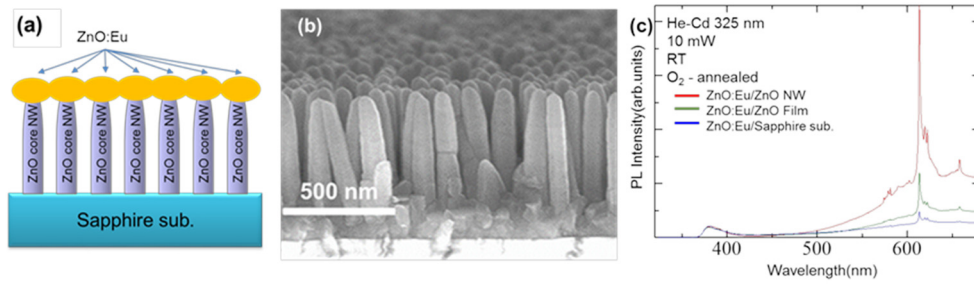


図 1 (a) ZnO ナノワイヤ上 ZnO:Eu 膜の概念 (b) ZnO ナノワイヤの SEM 像 (c) サファイア基板上 ZnO:Eu/ZnO ナノワイヤの室温 PL 特性

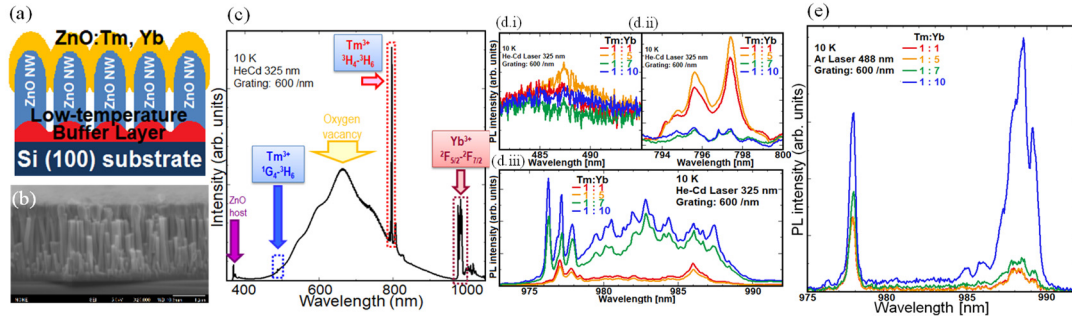


図 2 ZnO:TM,Yb/ZnO ナノワイヤの (a) 概念図および (b) 断面 SEM 像と (c) 間接励起による低温 PL 特性 (d) 異なる混晶比のターゲットで作製した ZnO:TM,Yb/ZnO ナノワイヤの 487, 798, 980 nm 付近の間接励起による低温 PL スペクトル (e) 異なる混晶比のターゲットで作製した ZnO:TM,Yb/ZnO ナノワイヤの 980nm 付近における直接励起による低温 PL スペクトル

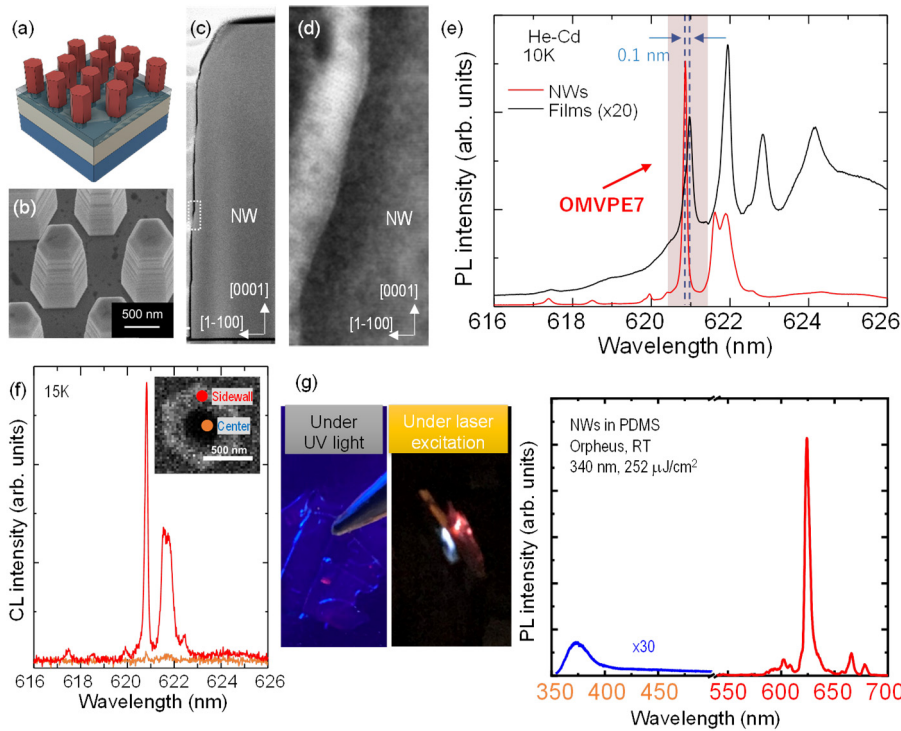


図 3 GaN:Eu/GaN ナノワイヤの (a) 概念図 (b) SEM 像および (c, d) 断面 TEM 像 (e) GaN:Eu/GaN ナノワイヤの低温 PL スペクトル (f) GaN:Eu/GaN ナノワイヤの低温 CL スペクトルとマッピング像 (g) ポリジメチルシロキサンに転写した GaN:Eu/GaN ナノワイヤの赤色発光と室温 PL スペクトル

定した CL 像 (図 3 (f)) において、Eu 発光がリング状に存在していることが判明した。これは Eu が主にナノワイヤ側壁に取り込まれコアシェル構造を形成していることを示唆しているものである。加えて、PDMS に転写した GaN:Eu ナノワイヤの発光スペクトルを測定した結果、Eu からの室温赤色発光が観測されており、GaN:Eu ナノワイヤのフレキシブル基板への転写に成功した (図 3 (g))。

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 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tatebayashi J., Mishina M., Nishiyama N., Timmerman D., Ichikawa S., Fujiwara Y.	4. 巻 60
2. 論文標題 Formation and optical characteristics of ZnO:Eu/ZnO nanowires grown by sputtering-assisted metalorganic chemical vapor deposition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCE05 ~ SCCE05
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abebbb	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 Otabara Takaya, Tatebayashi Jun, Hasegawa Shunya, Timmerman Dolf, Ichikawa Shuhei, Ichimiya Masayoshi, ASHIDA Masaaki, FUJIWARA Yasufumi	4. 巻 xx
2. 論文標題 Formation and optical characteristics of GaN:Eu/GaN core-shell nanowires grown by organometallic vapor phase epitaxy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 xxxxxx-xxxxxx
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac4e4c	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19件（うち招待講演 5件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 J. Tatebayashi, T. Nakajima, N. Nishiyama, D. Timmerman, S. Ichikawa and Y. Fujiwara
2. 発表標題 Formation and optical characteristics of ZnO:Tm,Yb/ZnO nanowires towards photovoltaic applications
3. 学会等名 International Conference on Nano-photonics and Nano-optoelectronics 2021.（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Otabara, J. Tatebayashi, S. Hasegawa, S. Ichikawa, M. Ashida, and Y. Fujiwara
2. 発表標題 Formation and optical characteristics of GaN:Eu/GaN core-shell nanowires grown by organometallic vapor phase epitaxy
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021), 28B-3-2, 2021 October.（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三品匡央、館林潤、中島徳仁、市川修平、藤原康文
2. 発表標題 スパッタリング援用MOCVD法によるEu添加ZnOナノワイヤ構造の作製とEu発光特性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会、20p-E302-13、北海道大学札幌キャンパス、札幌市、9月18-21日 (2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 館林潤、D. Timmerman、市川修平、藤原康文
2. 発表標題 ナノ構造及び共振器導入によるEu添加窒化物半導体の高輝度化
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会、20a-N304-1、北海道大学札幌キャンパス、札幌市、9月18-21日 (2019). (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Tatebayashi, T. Nakajima, N. Nishiyama, D. Timmerman, S. Ichikawa and Y. Fujiwara
2. 発表標題 Formation and optical characteristics of ZnO:Tm,Yb/ZnO nanowires towards photovoltaic applications
3. 学会等名 International Conference on Nano-photonics and Nano-optoelectronics 2021, ICNN-7-01 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Otabara, J. Tatebayashi, S. Hasegawa, S. Ichikawa, M. Ashida, and Y. Fujiwara
2. 発表標題 Formation and optical characteristics of GaN:Eu/GaN core-shell nanowires grown by organometallic vapor phase epitaxy
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021), 28B-3-2 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大田原崇也、館林潤、長谷川竣也、市川修平、芦田昌明、藤原康文
2. 発表標題 フレキシブル基板上Eu添加GaNナノワイヤからの室温赤色発光
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会、10p-N101-14
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jun Tatebayashi
2. 発表標題 Exploration of semiconductor nanowire photonics towards advent of super-smart societies
3. 学会等名 2022 ASEAN Joint Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 館林潤、西山直登、西村和人、大田原崇也、谷口輝樹、Fang Zhidong、市川修平、藤原康文
2. 発表標題 Society 5.0実現に役立つ希土類ナノフォトニクスの開拓
3. 学会等名 量子生命科学会第3回大会、02C-6
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Otabara, J. Tatebayashi, S. Hasegawa, S. Ichikawa, M. Ashida, and Y. Fujiwara
2. 発表標題 Growth and optical characteristics of GaN:Eu/GaN core-shell nanowires by organometallic vapor phase epitaxy
3. 学会等名 40th Electronic Materials Symposium, P2-B06
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 J. Tatebayashi, S. Ichikawa, and Y. Fujiwara
2. 発表標題 Enhanced Eu luminescence in GaN:Eu,O-based light emitting diodes via introduction of nanostructures and nanocavities
3. 学会等名 27th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西山直登、館林潤、市川修平、藤原康文
2. 発表標題 Si基板上Tm,Yb共添加ZnOナノワイヤの結晶成長と発光特性評価
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 N. Nishiyama, J. Tatebayashi, S. Ichikawa, and Y. Fujiwara
2. 発表標題 Formation and optical characteristics of Tm,Yb-codoped ZnO nanowires on silicon substrates by sputtering-assisted MOCVD
3. 学会等名 39th Electronic Materials Symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 館林潤、市川修平、藤原康文
2. 発表標題 超スマート社会実現に資するナノワイヤフォトニクスの開拓
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 J. Tatebayashi, T. Nakajima, M. Mishina, D. Timmerman, S. Ichikawa and Y. Fujiwara
2. 発表標題 Observation of down-conversion behavior in ZnO:Tm,Yb/ZnO core-shell nanowires
3. 学会等名 the 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductor (APWS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Tatebayashi
2. 発表標題 Formation and optical characteristics of rare-earth-doped ZnO nanowires towards photovoltaic applications
3. 学会等名 16th Annual German-Japanese Colloquium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 館林潤、中島徳仁、三品匡央、D. Timmerman、市川修平、藤原康文
2. 発表標題 Tm,Yb共添加ZnOナノワイヤ構造におけるダウンコンバージョン挙動の観測
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Tatebayashi, T. Nakajima, M. Mishina, D. Timmerman, S. Ichikawa, and Y. Fujiwara
2. 発表標題 Observation of the down-conversion behavior in ZnO:Tm,Yb/ZnO core-shell nanowires
3. 学会等名 38th Electronic Materials Symposium
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Mishina, J. Tatebayashi, T. Nakajima, S. Ichikawa, and Y. Fujiwara
2. 発表標題 Formation and optical characteristics of Eu-doped ZnO nanowires grown by sputtering-assisted metalorganic chemical vapour deposition
3. 学会等名 38th Electronic Materials Symposium
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	市川 修平  (Ichikawa Shuhei)  (50803673)	大阪大学・超高压電子顕微鏡センター・助教   (14401)	

	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	藤原 康文  (Fujiwara Yasufumi)		

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
---------	---------