

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03223

研究課題名(和文) 半導体ナノワイヤによるSi基板上発光デバイスの研究

研究課題名(英文) Study on Light-Emitting Devices on Si Substrates based on Semiconductor Nanowires

研究代表者

本久 順一 (Motohisa, Junichi)

北海道大学・情報科学研究所・教授

研究者番号：60212263

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)：成長時のIn原料の供給組成比を適切に制御し、PL測定および光電流スペクトル測定による吸収端波長の評価により、通信波長帯で発光するSi基板上InGaAsナノワイヤアレイの形成を確認した。また、InP系ナノワイヤによる発光ダイオードの発光特性を評価し、発光機構が発光性トンネルリングであることを明らかにした。V族組成比の制御およびアニールによりナノワイヤサイズの制御の結果、通信波長帯で発光するInAsP/InP量子ドットナノワイヤを得ることに成功した。pn接合を有するInAsP/InPヘテロ構造ナノワイヤを用いて発光ダイオードを作製し、InAsPに由来する近赤外領域からの発光を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シリコン(Si)は集積回路など、応用上最も重要な半導体であるが、今後、高度な情報処理にはSi基板上に様々な光素子・光部品をSiプラットフォーム上でコンパクトに集積することが必要となっている。ここで最大の課題点はSiが発光素子には適していないことであり、よって、Si基板上に発光素子に適した材料の形成が必要である。本研究において、半導体ナノワイヤを利用することにより、発光素子をSi基板上に集積することが可能になり、また通信波長帯で動作する素子の実現が可能となる。これは、電子回路と光回路とを融合させた集積回路の実現につながり、情報通信技術に進展をもたらす。

研究成果の概要(英文)：We attempted the growth of InGaAs nanowires (NWs) on Si substrates by selective-area metalorganic vapor-phase epitaxy. By controlling the supply ratio of source materials of group III atoms, emission from InGaAs NW arrays in the telecommunication bands was successfully confirmed by the low-temperature photoluminescence measurement. InGaAs NW arrays with a vertical pn junction are also fabricated and photocurrent spectroscopy reveals that fabricated NW array exhibited optical bandgap in the telecommunication bands. Emission mechanism of InP-based light-emitting diode (LED) was investigated and radiative tunneling was the dominant emission mechanism in the NW-LEDs. Control of the emission wavelength and size of InAsP quantum dots embedded in InP NWs were attempted and emission from the telecommunication band was demonstrated. NW-LEDs utilizing InAsP/InP heterostructure NWs were also fabricated and confirmed the light emission in the near-infrared regions originating from InAsP layer.

研究分野：半導体材料物性・半導体デバイス

キーワード：半導体ナノワイヤ 有機金属気相成長 選択成長 発光ダイオード 量子ドット

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光による情報通信技術は、Si-CMOS 集積回路技術や無線通信技術と並び、エレクトロニクスの中心的課題であり、情報化社会を支える基盤技術であるが、近年、そのさらなる進展を目的として、シリコンフォトニクスが注目を集め、世界的に研究が進められている。これは Si-CMOS の微細加工技術・集積化技術などを利用し、光導波路・光変調器といった様々な光素子・光部品を Si プラットフォーム上でコンパクトに集積して実現する(フォトニック集積化)するとともに、電子回路と光回路とを融合させた集積回路を実現しようとするものであるが、最大の課題は通信波長帯の光源である。その実現に向けさまざまなアプローチが取られており、中でも発光効率に優れた III-V 系、特に InP 系化合物半導体材料によるレーザを Si 上に形成する方法が最も有望視されているが、格子定数の違いなどから、III-V 族化合物半導体材料を Si 上に直接形成するのは困難である。このため現在では、個別のプロセスで作製した InP 系レーザをチップボンディングなどによって集積化する手法が主流であり、これは集積度や他の光素子との集積方法、さらにはコストの面で大きな問題となる。

### 2. 研究の目的

半導体ナノワイヤは、結晶成長により形成する直径数 nm から 100 nm 程度、長さ数 100 nm から数ミクロンの 1 次元細線的な構造である。本研究代表者は、有機金属気相成長 (MOVPE) を用いた選択成長法により基板から垂直に立った GaAs 系および InP 系ナノワイヤの作製およびそのデバイス応用に関する研究を行ってきたが、半導体ナノワイヤの特徴の一つとして、断面寸法が小さく、結晶成長上問題となる格子整合に関する制約が弱いこと、このため様々な基板にナノワイヤの形成が可能であり、Si 基板上に III-V 化合物半導体による素子の形成が容易であることが挙げられ、これまでに Si 基板上の発光ダイオード(LED)の作製に成功している。本研究ではこの点に着目し、研究代表者のこれまでの研究をさらに発展させることによって、高品質のナノワイヤ Si 基板上に直接形成し、ナノワイヤの特徴を活かした、通信波長帯で発光する素子を実現することを目的とする。

### 3. 研究の方法

- (1) 有機金属気相選択成長法による通信波長帯で発光する Si 基板上 InGaAs ナノワイヤの形成技術の確立
- (2) ナノワイヤを用いた電流注入発光素子の作製と評価
- (3) 通信波長帯で発光する量子ドットを含むナノワイヤ(ナノワイヤ量子ドット)の作製と評価

### 4. 研究成果

- (1) Si 基板上への通信波長帯用 InGaAs ナノワイヤの成長と評価

有機金属気相成長法による選択成長法を用いた InGaAs ナノワイヤの形成手順を図 1 に示す。成長原料にはトリメチルガリウム(TMGa)、トリメチルインジウム(TMIn)、アルシン(AsH<sub>3</sub>)を用いた。無極性の(111)Si 基板上に<111>B 方向にのみ成長する InGaAs ナノワイヤを垂直方向に成長させるため、最初に Si(111)基板を水素雰囲気中によるサーマルクリーニングを温度 900°C において行い、670°C で AsH<sub>3</sub> を供給する。そして、流量変調供給法(Flow-rate modulation epitaxy (FME))により InGaAs を成長した後、成長温度 670°C で InGaAs ナノワイヤを成長する。InGaAs 成長時の III 族原料の供給分圧 ([TMGa] および [TMIn]) の比  $p_{In} = [TMIn]/([TMIn]+[TMGa])$  を制御することによって、InGaAs ナノワイヤの混晶組成比が制御可能である。本研究では、通信波長帯である 1.55 μm 付近にバンド端発光を得るために、 $p_{In} = 0.41$  とした。図 2(a)に低温における InGaAs ナノワイヤの PL スペクトルを示す。ナノ

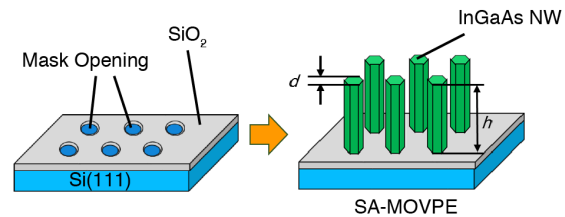


図 1: 有機金属気相選択成長を用いたナノワイヤ形成法

ワイヤの形成が容易であること、このため様々な基板上にナノワイヤの形成が可能であり、Si 基板上に III-V 化合物半導体による素子の形成が容易であることが挙げられ、これまでに Si 基板上の発光ダイオード(LED)の作製に成功している。本研究ではこの点に着目し、研究代表者のこれまでの研究をさらに発展させることによって、高品質のナノワイヤ Si 基板上に直接形成し、ナノワイヤの特徴を活かした、通信波長帯で発光する素子を実現することを目的とする。

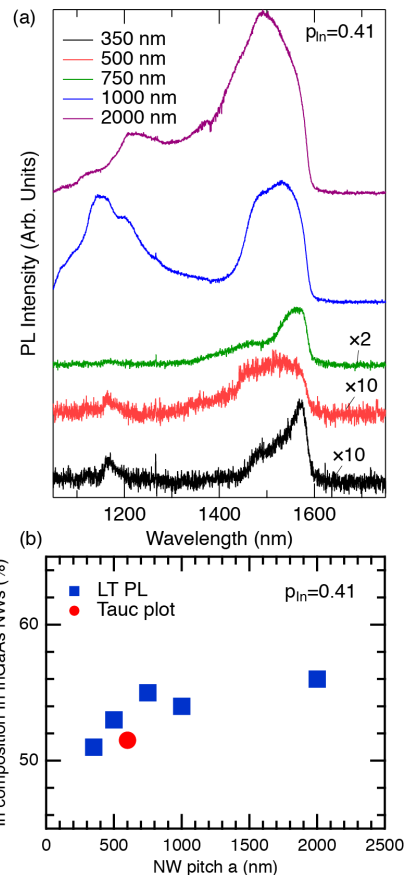


図 2: (a) Si 基板上の InGaAs ナノワイヤの PL スペクトル。(b) PL のピーク位置から見積ったナノワイヤ In 組成(青四角)と Tauc plot (図 3) から見積った In 組成

ワイヤアレイの周期  $a$  にピーク位置は依存しているが、通信波長帯( $\sim 1.55 \mu\text{m}$ )からの発光が確認された。図 2(b)は PL のピークエネルギーから見積った InGaAs ナノワイヤ中の In 組成  $x$  で成長時の供給組成  $p_{\text{In}}$  よりも大きくなっていること、およびナノワイヤアレイの周期  $a$  に依存していることがわかる。これは選択成長における、In 原料および Ga 原料の気相拡散および表面拡散の差に起因していると考えられる。さらに、この InGaAs ナノワイヤにドーピングすることによって、pin 接合を有する InGaAs ナノワイヤ構造を p 形 Si 基板上に形成し、その構造に対し上下に電極を作製した 2 端子素子を作製した。その素子の電流電圧特性を評価したところ、整流性を得ることができ、期待どおり pn 接合が得られていることを確認した。さらに、波長可変のレーザ光を照射しつつ光電流を測定することにより、バンド端のエネルギーおよび In 組成を光電流スペクトルによって評価した。図 3 に  $a=600 \text{ nm}$  の試料に対して得られた室温光電流スペクトルの Tauc plot を示す。この図より InGaAs ナノワイヤの吸収端が  $0.761 \text{ eV}$ 、そして In 組成が 51%であり、PL の結果とほぼ一致している。(図 2(b)の赤丸。) 以上のとおり、通信波長帯で発光する Si 上の InGaAs ナノワイヤアレイの形成に成功した。

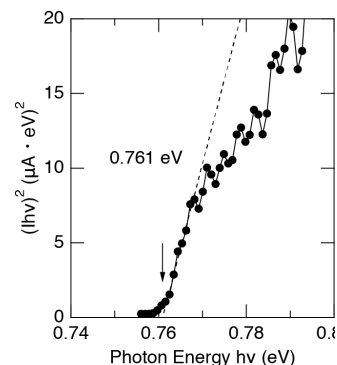


図 3: ナノワイヤアレイより得られた光電流スペクトルの Tauc plot

(2) ナノワイヤ発光ダイオードの発光特性の評価  
 発光素子の発光効率の向上に向けては、発光メカニズムの解明が不可欠である。このため、InP 基板上に形成した pn 接合を有する InP ナノワイヤを用いて発光ダイオード(LED)を作製し、LED の電圧電流( $I$ - $V$ )特性、発光スペクトル、および電流-発光強度( $I$ - $L$ )特性の温度依存性の評価を行った。その結果、まず順バイアス時の  $\log I$ - $V$  特性において、特性の傾きが温度によりほとんど変化しないことが確認され、このことより作製したナノワイヤ LED における pn 接合では、トンネル電流によるキャリア輸送が支配的であることが明らかとなった。また、外部量子効率の温度依存性、注入電流依存性を評価したところ、図 4 に示すとおり外部量子効率は室温から 160K までは温度とともに向上するが、160K 以下より効率ドループが現われ、そして 100K 付近でピークの値を得た。さらに温度を下げるとドループがさらに顕著となり効率が低下することがわかった。さらに、発光スペクトルのピークエネルギーのバイアス電圧依存性、ピーク強度のバイアス電圧依存性、そして、発光スペクトルの温度依存性(図 5)のいずれの結果も、本 InP ナノワイヤ LED の低温における発光機構が発光性トンネリングにより決定されていること、ならびに低温におけるドループの原因が非発光性トンネル電流のためであると結論された。

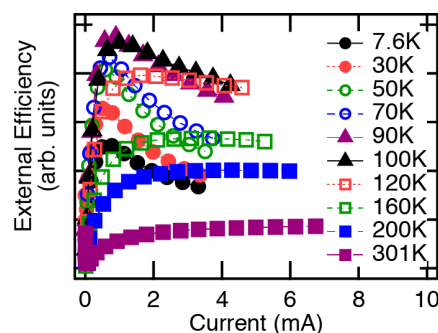


図 4: InP ナノワイヤ LED の発光効率の注入電流および温度依存性

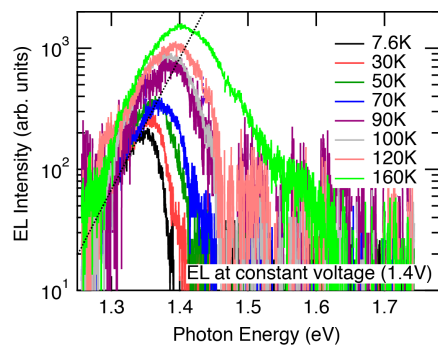


図 5: InP ナノワイヤ LED における発光スペクトルの温度依存性。低エネルギー側のテイルが温度に依存せず、これは発光機構が発光性トンネリングであることを示している。

(3) InP/InAsP/InP ヘテロ構造を利用したナノワイヤ量子ドットの発光波長制御とアニールによるサイズ微細化

通信波長帯のオンデマンド単一格子光源を最終目標として、InP 系ヘテロ構造ナノワイヤによる量子ドット形成と、その発光波長の制御を試みた。InP ナノワイヤ形成後、InAsP および InP を成長することにより、InP/InAsP/InP ヘテロ構造を形成し、その発光特性を低温顕微 PL 測定により評価した。InAsP 成長時の As 原料である  $\text{AsH}_3$  と P の原料である TBP(ターシャリーブチフォスフィン)との供給分圧比  $p_{\text{As}} = [\text{AsH}_3]/([\text{AsH}_3] + [\text{TBP}])$  を増加させることによって、成長した InAsP において P 組成が増加し、図 6 に示すとおり発光波長が長波長化することが確認された。特に、 $p_{\text{As}}=32\%$  のとき、波長  $1.473 \mu\text{m}$  において、量子ドットに起因する発光を確認した。また、ナノワイヤの断面寸法を微細化し、量子ドットの横方向閉じ込めを強くすること、および量子ドットの収率を向上させることを目的として、InP ナノワイヤを熱アニールすることにより、断面寸法の微細化・制御を試みるとともに、アニールした InP ナノワイヤに対して InAsP 量子ドットの形成を試みた。するとまず、TBP 雰囲気中、適切な条件下で InP ナノワイヤをアニールすることに

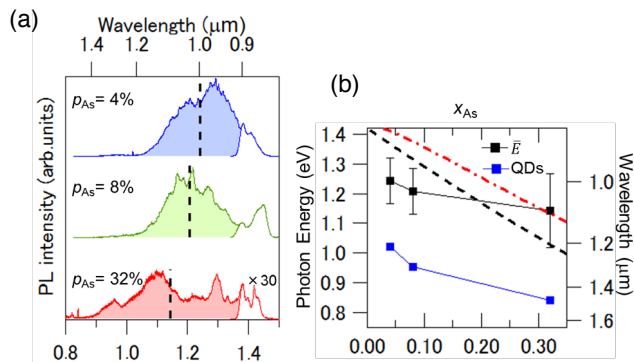


図 6 : (a) InP/InAsP ヘテロ構造ナノワイヤの発光スペクトル。(b) 発光波長の  $pAs$  依存性

より、アニール前の InP ナノワイヤ(図 7(a))と比較し、頂上寸法が減少することを確認した。そして最適化の結果、図 7(c)に示すとおり、断面寸法 20 nm の InP ナノワイヤの形成に成功した。そして InAsP/InP ヘテロ構造を成長したナノワイヤにおいても、InP ナノワイヤのアニールにより頂上寸法が微細化されていること(図 7(b)および(d))、また、断面寸法のサイズゆらぎが低減されていることを確認した。そして InAsP 量子ドットの発光特性を評価した。特に、アニールによる微細化の有無による、InAsP 量子ドットからの発光スペクトルの線幅を比較したところ、アニールなしの試料の平均半値幅 940  $\mu eV$  であるのに対し、アニール有の試料の平均半値幅 720  $\mu eV$  となり、アニール有の試料において発光半値幅の減少が確認された。これは微細化により横方向閉じ込めが強くなり、シュタルク効果によるスペクトル拡散が抑制されたためであると考えられる。最終的には、量子ドットの発光波長として、最長 1.55  $\mu m$  からの発光を確認した。(図 7)

#### (4) InAsP/InP ヘテロ構造ナノワイヤを利用した LED 作製と評価

InP ナノワイヤによる pin 接合中に InAsP 層を埋め込むことによって作製したヘテロ構造ナノワイヤ LED を作製した。そして、図 8(a)に示すとおり、InAsP 活性層からの近赤外電流注入発光を得ることに成功した。また、発光スペクトルをエネルギー分離した結果、InAsP 活性層からの発光は、注入電流量に対して飽和傾向を示すことが明らかとなった。(図 8(b)) これは InAsP 層に注入されたキャリアのオーバーフローのためであるとともに、InP からの発光も同時に観測されていることから、キャリアの InAsP 活性層への注入効率が十分でないことに起因すると結論づけた。

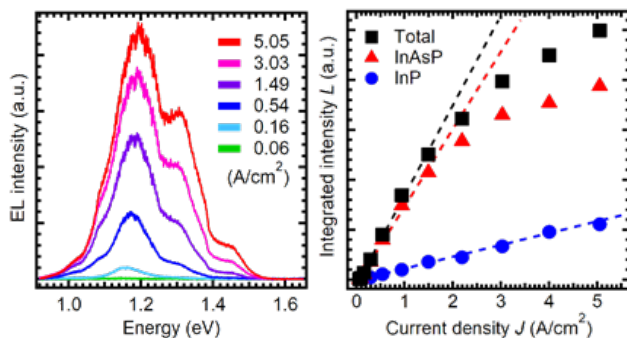


図 8 : (a) InP/InAsP ヘテロ構造ナノワイヤ LED の発光スペクトル。(b) スペクトル分離した発光強度の注入電流密度依存性

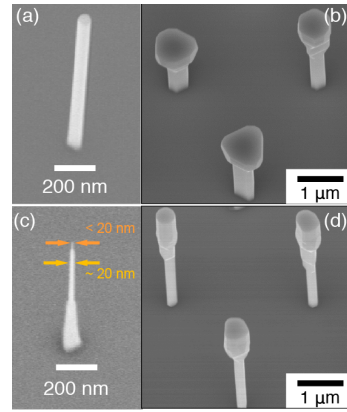


図 7 : アニールによるナノワイヤ形状の変化。(a)アニール前の InP ナノワイヤおよび、(b) InP/InAsP/InP ヘテロ構造ナノワイヤ。(c)アニール後の InP ナノワイヤ、および(d) InP ナノワイヤをアニール後に InAsP/InP を成長したヘテロ構造ナノワイヤ。アニール温度は 600°C である。

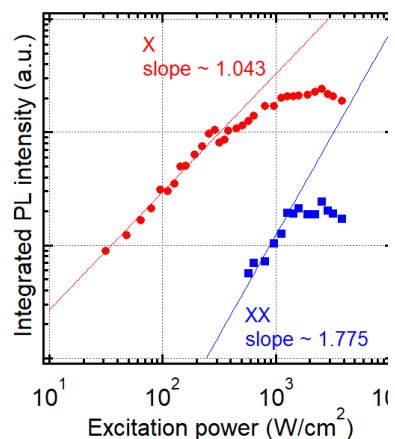
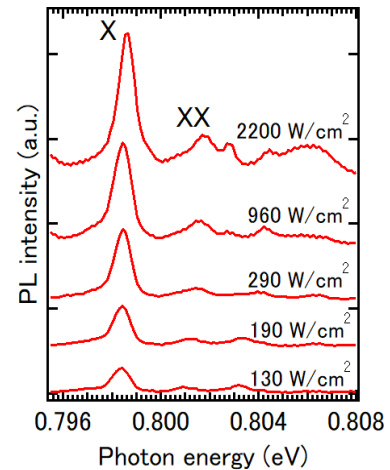


図 7 : (a) InP ナノワイヤアニール後に形成した InAsP/InP ヘテロ構造中より形成された量子ドットの PL スペクトルおよび励起光強度依存性。(b) 発光ピークの積分強度の励起光強度依存性。X は励起子からの発光を、XX は励起子分子からの発光を表わす。

また、InAsP 層からの発光波長はナノワイヤアレイの間隔とともに長波長側にシフトすることが観測され、通信波長帯で動作する InAsP/InP ヘテロ構造ナノワイヤを用いた単一光子光源実現に向け、ナノワイヤ量子ドットの密度(ナノワイヤ間隔)を考慮した InAsP 組成の制御が重要となることが明らかとなった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tomoya Akamatsu, Katsuhiko Tomioka, Junichi Motohisa	4. 巻 31
2. 論文標題 Demonstration of InP/InAsP/InP axial heterostructure nanowire array vertical LEDs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 accepted
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6528/ab9bd2	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 Motohisa Junichi, Kameda Hiroki, Sasaki Masahiro, Tomioka Katsuhiko	4. 巻 30
2. 論文標題 Characterization of nanowire light-emitting diodes grown by selective-area metal-organic vapor-phase epitaxy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 134002 ~ 134002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6528/aafce5	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 Chiba Kohei, Yoshida Akinobu, Tomioka Katsuhiko, Motohisa Junichi	4. 巻 6
2. 論文標題 Vertical InGaAs Nanowire Array Photodiodes on Si	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 260 ~ 264
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsp Photonics.8b01089	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 Kohei Chiba, Katsuhiko Tomioka, Akinobu Yoshida, and Junichi Motohisa	4. 巻 7
2. 論文標題 Composition controllability of InGaAs nanowire arrays in selective area growth with controlled pitched on Si platform	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 125304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.4993689	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 -

[学会発表] 計26件(うち招待講演 2件/うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Junichi Motohisa and Katsuhiko Tomioka
2. 発表標題 InP-based Nanowires Towards On-demand Single Photon Emitters
3. 学会等名 2019 International Workshop on Physics of Semiconductor Devices (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoya Akamatsu, Masahiro Sasaki, Hiroki Kameda, Katsuhiko Tomioka, and Junichi Motohisa
2. 発表標題 InP/InAsP/InP heterostructure nanowire LEDs for a single photon emitter
3. 学会等名 Nanowire Week 2019(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤松 知弥, 佐々木 正尋, 富岡 克広, 本久 順一
2. 発表標題 InPナノワイヤ量子ドットの熱アニールによる直径微細化と発光特性
3. 学会等名 第80回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junichi Motohisa and Katsuhiko Tomioka
2. 発表標題 InP-based Nanowires Towards On-demand Single Photon Emitters
3. 学会等名 2019 International Workshop on Physics of Semiconductor Devices (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoya Akamatsu, Masahiro Sasaki, Hiroki Kameda, Katsuhiko Tomioka, and Junichi Motohisa
2. 発表標題 InP/InAsP/InP heterostructure nanowire LEDs for a single photon emitter
3. 学会等名 Nanowire Week 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤松 知弥, 佐々木 正尋, 富岡 克広, 本久 順一
2. 発表標題 InPナノワイヤ量子ドットの熱アニールによる直径微細化と発光特性
3. 学会等名 第80回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sasaki, K. Chiba, A. Yoshida, K. Tomioka, J. Motohisa
2. 発表標題 Size Control of InP NWs by in situ Thermal Annealing in MOVPE
3. 学会等名 19th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XIX) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Motohisa, H. Kameda, M. Sasaki, K. Tomioka
2. 発表標題 Characterization of Nanowire Light-emitting Diodes Grown by Selective-area MOVPE
3. 学会等名 19th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XIX) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 J. Motohisa, H. Kameda, M. Sasaki, K. Tomioka
2. 発表標題 Study on emission mechanism in InP-based nanowire LEDs
3. 学会等名 Nanowire Week 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Motohisa, H. Kameda, M. Sasaki, K. Tomioka
2. 発表標題 Electroluminescence from InP-based Heterostructure Nanowires
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木 正尋、千葉 康平、富岡 克広、本久 順一
2. 発表標題 有機金属気相選択成長により作製したInPナノワイヤのサイズ制御
3. 学会等名 第10回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本久 順一、亀田 滉貴、佐々木 正尋、富岡 克広
2. 発表標題 InPナノワイヤLEDの温度依存性評価
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 佐々木 正尋、千葉 康平、吉田 旭伸、富岡 克広、本久 順一
2. 発表標題 熱アニールによるInPナノワイヤのサイズ制御の検討
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 赤松 知弥、亀田 滉貴、佐々木 正尋、富岡 克広、本久 順一
2. 発表標題 InP/InAsPナノワイヤLEDの電流注入発光特性評価
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 本久 順一、亀田 滉貴、佐々木 正尋、富岡 克広
2. 発表標題 InPナノワイヤLEDにおける発光効率の温度依存性
3. 学会等名 The 37th Electronic Materials Symposium (EMS 37)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤松 知弥、亀田 滉貴、佐々木 正尋、富岡 克広、本久 順一
2. 発表標題 InP/InAsPナノワイヤLEDの電流注入発光特性
3. 学会等名 The 37th Electronic Materials Symposium (EMS 37)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木 正尋、富岡 克広、本久 順一
2. 発表標題 アニールによるInPナノワイヤ直径微細化
3. 学会等名 第54回応用物理学会北海道支部/第15回日本光学会北海道支部 合同学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤松 知弥、亀田 滉貴、佐々木 正尋、富岡 克広
2. 発表標題 InP/InAsP/InPヘテロ構造ナノワイヤLEDの作製と評価
3. 学会等名 2018年度電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Kameda, K. Tomioka, F. Ishizaka, M. Sasaki, J. Motohisa
2. 発表標題 Improved characteristics of InP-based nanowire light-emitting diodes
3. 学会等名 22nd International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 18th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (EP2DS-22/MSS-18) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Sasaki, H. Kameda, K. Tomioka, J. Motohisa
2. 発表標題 Nanowire quantum dots emitting at telecom wavelength
3. 学会等名 The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Chiba, K. Tomioka, A. Yoshida, J. Motohisa
2. 発表標題 Integration of InGaAs nanowires on Si(111) for optical devices
3. 学会等名 The 15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Junichi Motohisa, Hiroki Kameda, Masahiro Sasaki, and Katsuhiko Tomioka
2. 発表標題 Characterization of Nanowire Light-emitting Diodes Grown by Selective-area MOVPE
3. 学会等名 19th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-19) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junichi Motohisa, Hiroki Kameda, Masahiro Sasaki, and Katsuhiko Tomioka
2. 発表標題 Study on Emission Mechanisms in InP-based Nanowire LEDs
3. 学会等名 Nanowire Week 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木 正尋、千葉 康平、吉田 旭伸、富岡 克広、本久 順一
2. 発表標題 InAsP 埋め込み InP ナノワイヤにおける発光波長制御
3. 学会等名 第9回 ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐々木 正尋、千葉 康平、富岡 克広、本久 順一
2. 発表標題 InAsP量子ドットナノワイヤにおける通信波長帯発光
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 佐々木 正尋、千葉 康平、富岡 克広、本久 順一
2. 発表標題 通信波長帯で発光するナノワイヤ量子ドットの成長と評価
3. 学会等名 The 36th Electronic Materials Symposium (EMS 36)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Junichi Motohisa and Shinjiro Hara	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 未定
3. 書名 Nanowire Field Effect Transistors (in "Fundamental Properties of Semiconductor Nanowires")	

〔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	原 真二郎  (Hara Shinjiro)  (50374616)	北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・准教授    (10101)	

