

令和 5 年 5 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02176

研究課題名(和文) 半導体ナノワイヤを用いたベクトル光波の発生

研究課題名(英文) Generation of Vector Beams using Semiconductor Nanowires

研究代表者

本久 順一 (Motohisa, Junichi)

北海道大学・情報科学研究院・教授

研究者番号：60212263

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：GaAs/InGaAs/GaAs コアシェル型ヘテロ構造ナノワイヤより放出される光について、発光スペクトル、発光のビーム形状、偏光状態の解析を行った。低温連続光励起の条件下では、光共振器構造に由来する半値幅の鋭いピークが観測されたが、パルス光励起の場合、励起光強度の増大とともに非線形的にピーク強度が増大する半値幅の鋭い発光が観測され、ナノワイヤのレーザ発振を確認した。そのピークの光のビーム形状は中空で、さらに、偏光解析より軸対称の偏光分布を有していることが明らかとなった。以上より、ナノワイヤをレーザ発振させることによって中心に強度特異点を有する軸対称ベクトル光波が発生可能であること示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ベクトル光波は、通常の光波とは異なる光としての特徴を持ち、光マニピュレーション、光トラッピング、レーザ加工、超解像イメージング、光通信、量子光通信や粒子加速など、多岐に渡る分野での応用が期待されているが、一般的に発生方法が煩雑で、簡便な発光源の開発が求められている。本研究において、半導体ナノ構造として形成が容易な、断面寸法サブミクロン程度の微小なナノワイヤがレーザ発振すること、そしてレーザ発振時に軸対称ベクトル光波が発生可能であることを示した。これにより、ナノワイヤは小型のベクトル光波源としての可能性が示されるとともに、ベクトル光波の応用可能性を一段と高めている。

研究成果の概要(英文)：We carried out the characterization of emitted light from GaAs/InGaAs/GaAs core-multishell nanowires (NWs) under laser light excitation. Under continuously working excitation, multiple sharp peaks originating from the optical cavity were observed. Under pulsed excitation, sharp peaks were observed, and their intensity increased superlinearly with excitation intensity, which indicated laser oscillation in NWs. Direct observation of the spectrally filtered peak revealed that the beam shape was hollow, indicating the existence of the singularity in its beam center. Furthermore, polarization analysis showed that the lasing beam exhibited cylindrically symmetric distribution in the polarization. These experimental results are in good agreement with calculations and indicate that NWs are a promising candidate for a compact light source of the cylindrical vector beams.

研究分野：半導体デバイス工学

キーワード：半導体ナノワイヤ ベクトル光波 偏光 ナノワイヤレーザ

### 1. 研究開始当初の背景

近年、ラゲールガウスビーム(LG光)に代表されるらせん状の等位相面を持つ光渦(図1(a))や、動径方向もしくは方位方向に対称な偏光分布を持ち、偏光渦(軸対称ベクトル光波、図1(b),(c))など、位相や偏光の特異点を持つ光波が注目を集めている。これらの光波は、その特異点のために、一般的なレーザの固有モードであるエルミートガウスビーム(HG光)とは異なる振舞いを示す。その一例として集光特性があり、例えば径偏光した偏光渦では特異点であるビームの中心点付近で光軸方向に電場が発生する。このような特徴を活かし、これらの光波は光マニピュレーション、光トラッピング、レーザ加工、超解像イメージング、光通信、さらには量子光通信や粒子加速など、多岐に渡る分野で応用が期待されている。

このうち、軸対称ベクトル光波を発生する方法の一つとして、光ファイバのような円筒導波路のような構造を利用してモード変換やレーザ発振させる方法がある。ただし、これらの方法においては、レーザの最低次の発振モードはHGモード、一方LGモードや偏光渦は高次のモードであるため、モード変換は効率が悪く、また、直接発振させるためにはさまざまな工夫が必要とされており、必然的に大がかりなレーザシステムが必要となり、また受動光部品による光強度などの制限も存在する。このため、先に述べた応用分野への活用に向けては、コンパクトな光渦源・偏光渦源を実現するためのブレークスルーが求められる。すなわち、外部受動光部品に頼らず、レーザダイオードのように電流注入により発振する光源や、光マニピュレーションで操作する対象となる物体と同程度のサイズの微小な光源が実現できれば、これらの光波の可能性・応用分野をさらに広げることが可能である。

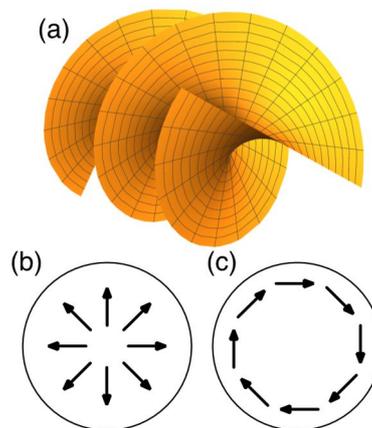


図1: (a)LG光の等位相面。(b)径偏光渦および(c)方位偏光渦

### 2. 研究の目的

本研究の目標は、半導体ナノワイヤを用いることによって、外部素子の助けなしにベクトル光波を発生することである。半導体ナノワイヤは断面寸法がサブミクロンから数10nmの半導体の細線構造の半導体材料であり、光を断面方向に閉じ込めるとともに、軸方向に伝搬させる導波路としての性質を持っている。この特性を利用して、現在、ナノメートルサイズのレーザ素子への応用に向け研究が進められているが、本研究では、これまであまり省みられていなかったナノワイヤにおけるレーザ発振の横モードと偏光状態に着目した。すなわち、ナノワイヤ中を伝搬する導波モードと軸対称ベクトル光波に親和性があることから、ナノワイヤによるナノレーザがベクトル光波源として活用できると考え、その実証を試みた。

### 3. 研究の方法

本研究では、ナノワイヤから軸対称ベクトル光波が発生可能であることを示すため、GaAs/InGaAs/GaAs コアシェル型ヘテロ構造ナノワイヤ(図2(a)(b))を対象に以下の点を明らかにするため、その発光特性を評価した。

- (1) パルス光励起時に得られた発光特性が、レーザ発振に起因すること。
- (2) 試料から得られた発光が、中心に特異点を有するベクトル光波であること
- (3) 得られたベクトル光波のモードを同定すること

測定系を図2(c)に示す。試料であるGaAs/InGaAs/GaAs コアシェル型ヘテロ構造ナノワイヤは有機金属気相選択成長法により作製[1]したものであり、これまでの研究に共振器モードが存在することが明らかとなっている。

### 4. 研究成果

- (1) 連続光(CW)励起およびパルス光励起における発光特性

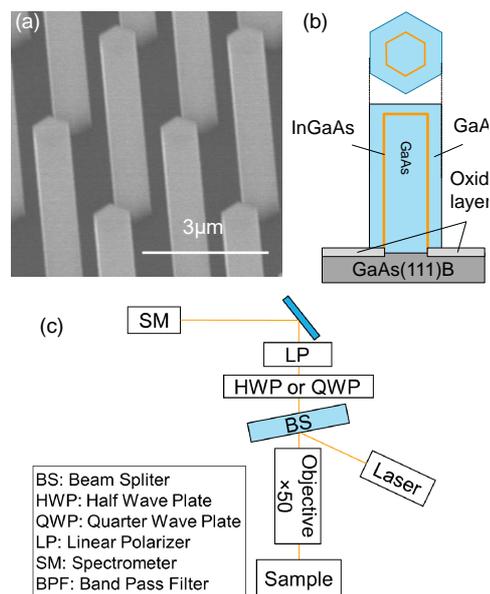


図2: 研究に用いたコアシェル型ヘテロ構造ナノワイヤナノワイヤの(a)電子顕微鏡写真と(b)断面模式図。(c)光学特性評価実験系

図 3(a)に異なる 3 本のナノワイヤ(NW a, b, c)の CW 励起(実線)およびパルス光励起(点線)により得られた発光スペクトルを示す。スペクトル形状および発光ピークの位置はナノワイヤにより差があるが、これは個々のナノワイヤのサイズの差や主たる発光層である InGaAs 層の膜厚・組成の差に起因すると考えられる。CW 励起ににおいて、NW b, c では鋭いピークが現われている。これらはこれまでの発光ピーク位置の温度依存性の結果により、ナノワイヤ共振器の共振モードに起因することがわかっている [1]。一方、パルス光励起の場合、いずれも CW 時の発光ピークもしくはブロードな発光ピークの単波長(高エネルギー)側に鋭いピークが得られた。以下 NW c に対する結果のみ述べるが、図 3(b)に示すとおり

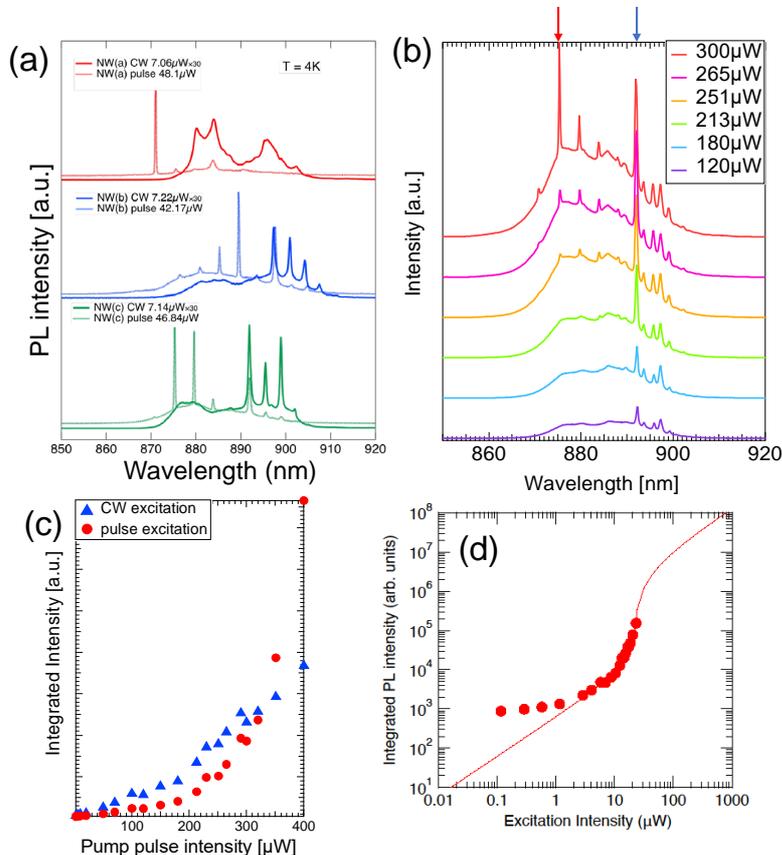


図 3 : (a) 個々のナノワイヤ発光スペクトル。NW c における発光スペクトル(b) およびピーク強度(c)のパルス励起光強度依存性。(d)パルス光励起によって発現したピークのレート方程式によるフィッティング結果

このパルス光励起時に得られた発光ピーク(赤矢印)は励起光強度に対して非線形的に増加し、これは低励起条件もしくは CW 励起条件で得られたピーク(青矢印)の強度が励起光強度に対してほぼ線形的に増加するのと対照的である(図 3(c))。そして、このピークの発光強度の励起光強度依存性について微小共振器レーザのレート方程式[2,3]によりフィッティングしたところ、図 3(d)に示すとおり良好な結果が得られた。以上によりパルス光励起により本 GaAs/InGaAs/GaAs コアシェル型ヘテロ構造ナノワイヤがレーザ発振することが確認された。

## (2) ビームプロファイルの直接観測とその偏光依存性

図 4(a)にナノワイヤのレーザ発振により得られたビームのプロファイルを CCD カメラにより直接観測した結果を図 4 に示す。ビームの中心部の強度が弱く、ドーナツ状のビームプロファイルであることがわかる。さらに、図 3(b)の赤矢印の発光ピークをバンドパスフィルタ(BPF)を用いて切りだした場合に得られたビームの強度分布を図 4(b)に示す。ドーナツ状のビームプロファイルがさらに明瞭になり、このピークのビームの中心に強度特異点があることがわかる。そして BPF に加え、図 2(b)のとおり半波長板(HWP)と偏光子を通過した光を、半波長板の回転角を変化させながら観測した結果を図 4(c), (d), (e)に示す。半波長板の回転角の変化とともに、得られたビームプロファイルが回転していることが明らかである。以上の結果は、パルス光励起により得られたレーザ発振のピークが軸対称ベクトル光波となっていることを示しており、ナノワイヤからのベクトル光波の発生が確認された。ここで図 4(c), (d), (e)の結果を

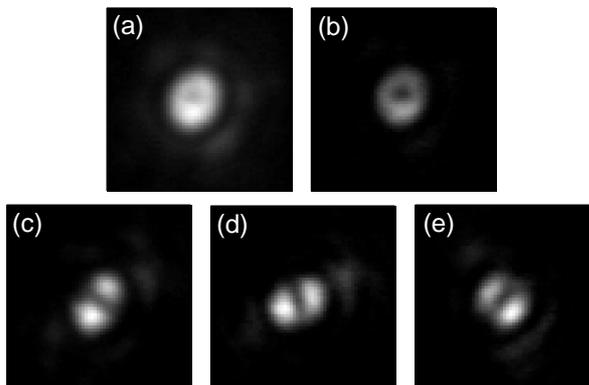


図 4: パルス光励起下で種々の条件により得られた発光像。(a)BPF なし、偏光板なしの場合、(b)BPF 通過後の発光像。(c), (d), (e)BPF 通過後、さらに半波長板と直線偏光子(垂直配置)を通過した場合に得られた発光像。ここで波長板の回転角は直線偏光子に対し、(c) 0°、(d) 22.5°、(e) 45° である。ここで半波長板の回転方向は反時計回りに回転していることに注意。

注意深く観察すると、像の回転方向が半波長板の回転方向とは逆方向となっている。これはビームプロファイルが図 1(b)(c)で示した基本的なベクトル光波である径偏光、方位偏光のいずれでもないことを示している。さらに、偏光子の角度(垂直)に対し半波長板の角度が  $0^\circ$ (垂直偏光を検出)もしくは  $45^\circ$ (水平偏光を検出)のとき、必ずしもビーム中心に対し垂直もしくは水平位置に強度が最大となるスポットが現われていない。これらの結果は、後述のとおり、得られたビームが高次のベクトル光波となっているが示している。なお、半波長板に変えて  $1/4$  波長板(QWP)を挿入し、回転させた場合には像の変化は少なく、よって円偏光成分は非常に小さいことは確認されている。

一方、CW 光励起時に得られたピークについて同様にビームプロファイルの直接観測を行ったところ、ビームの中心の特異点は観測されなかったが、サイドローブに方位偏光の成分があることが確認された。これは、CW 光励起時に得られた共振器モードによる発光ピークと、レーザ発振による発光ピークとでは、ナノワイヤ光共振器の横モードが異なることを示している。

### (3) 導波モードの解析とミュラー計算による実験結果のシミュレーション

ナノワイヤを円筒形状と仮定し、ステップインデックスファイバのモード方程式を解くことによって、ナノワイヤを伝搬する光の導波モードを計算した。そして、各モードの強度分布に従う光が半波長板、さらに偏光子(垂直直線偏光)を通過した場合に得られる強度分布を、ミュラー行列を使ったミュラー計算[4-6]により求めた。TM モード、TE モードの光に対する結果を図 5 に示す。軸対称ベクトル光波に対して予想されるビーム強度分布が得られており、また、反波長板を半時計回りに回転させた場合、回転方向と同じ反時計回りにビームプロファイルが回転するという結果が得られた。一方、図 6 に  $HE_{21}$  モードの光に対する結果を示す。TM モードに似た強度分布が得られているが、反波長板を半時計回りに回転させた場合のビームプロファイルは時計回りとなっている。

さらに、円筒ファイバでは電場の軸方向成分  $E_r(r, \theta)$  および動径方向成分  $E_\theta(r, \theta)$  に対し

$$E_r(r, \theta) \propto \cos(m \theta + \theta_0)$$

$$E_\theta(r, \theta) \propto \sin(m \theta + \theta_0)$$

といった依存性がある。ここで  $r$  は軸方向の座標、 $\theta$  は動径方向の座標、 $m$  は横モード番号、そして  $\theta_0$  は位相因子である。 $m=1$  が最低次のモード  $HE_{1n}$  モード( $n$  は軸方向のモード番号)、 $m=0$  が TE もしくは TM モードに対応し  $\theta_0 = 0$  もしくは  $\theta_0 = 90^\circ$  となり、そして  $m \geq 2$  がハイブリッドモードである。 $\theta_0$  が一定の時、 $m=1$  の場合直線偏光となるが、 $m \geq 2$  のとき、軸対称ベクトル光波となり、偏光状態は  $\theta_0$  に依存する。偏光子を垂直方向、半波長板  $0^\circ$  位置に固定し、 $\theta_0$  を変えた場合のビームプロファイルを図 6 に示す。 $\theta_0 = 45^\circ$  のとき、実験結果と同様に、中心に対し斜め方向に強度最大点があらわれていることがわかる。以上の結果は先に述べたレーザ発振によるピークに対する実験結果を再現しており、よってレーザ発振のピークの起因は  $HE_{21}$  モードであることが示された。 $HE_{21}$  モードがレーザ発振した理由としては、他のモードと比較し、モードの電場と活性層である InGaAs シェル層との重なりが大きいこと、ナノワイヤ端面の反射率が高く共振器 Q 値が高いこと、などが考えられるが、詳細についてはさらなる検討が必要である。なお、このナノワイヤ断面寸法と発振波長の範囲では、モードは低次のものから順に  $HE_{11}$ ,  $TE_{01}$ ,  $HE_{21}$ ,  $TM_{01}$  となっていることが確認され、CW 励起では  $HE_{11}$  モードと、 $TE_{01}$

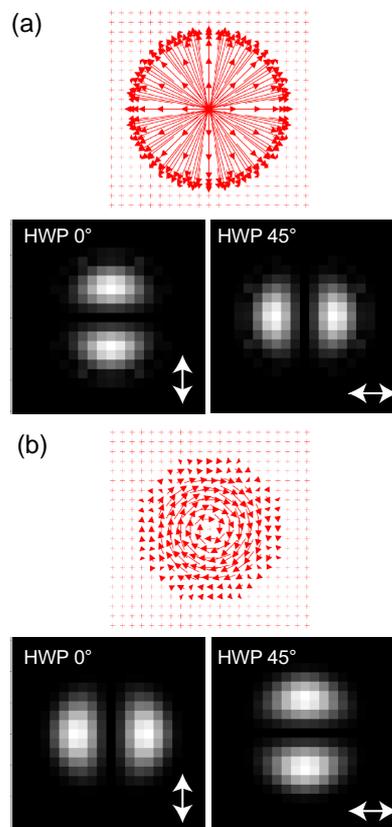


図 5: 円筒ステップインデックスファイバの TM モード(a)および TE モード(b)の光の偏光分布と、波長板・直線偏光子を通過した場合のビームプロファイルのシミュレーション結果。半波長板の回転方向は反時計回りで、像も反時計回りに回転している。

モードが現われやすく、その次のモードとして  $HE_{21}$  モードがレーザ発振時にあらわれた、とも考えられる。

【参考文献】

1. T. Wada, S. Hara, and J. Motohisa: Extended Abstracts of SSDM 2015. <https://doi.org/10.7567/SSDM.2015.D-4-3> (2015).
2. J. Ho, J. Tatebayashi, S. Sergent, C. F. Fong, S. Iwamoto, and Y. Arakawa: ACS Photon., 2, 165 (2015).
3. J. Tatebayashi, S. Kako, J. Ho, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa: Nat. Photon. 9, 501 (2015).
4. W. A. Shurcliff, *Polarized Light* (Harvard University Press, Cambridge, MA, 1962).
5. E. Hecht, *Optics* 2nd ed., Addison-Wesley (1987).
6. D. H. Goldstein, *Polarized Light*, Third Ed. (CRC Press) (2011).

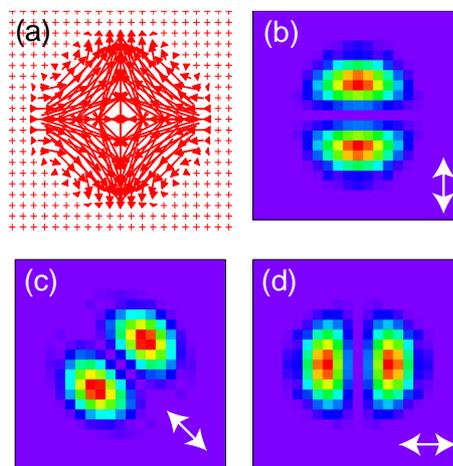


図 6: 円筒ステップインデックスファイバの  $HE_{21}$  モードの光の偏光分布に対するビームプロファイルのシミュレーション結果。半波長板の回転方向は反時計回りであるのに対し、像は時計回りに回転しており、図 4 の結果を再現している。

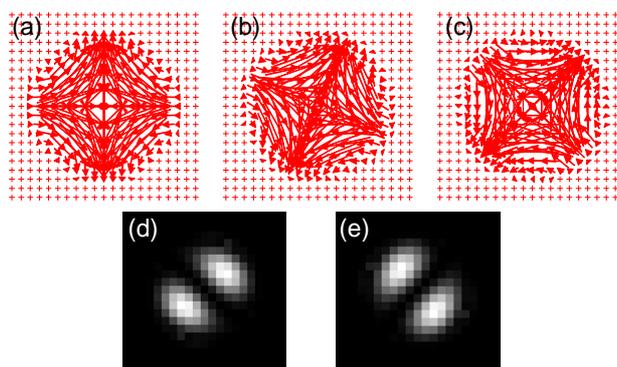


図 7: 位相因子を考慮した  $HE_{21}$  モードの光の偏光分布とビームプロファイルのシミュレーション結果。

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 2件）

1. 著者名 Kunimoto Taiga, Obara Shizuka, Hara Shinjiro, Motohisa Junichi	4. 巻 62
2. 論文標題 Generation of cylindrical vector beam from GaAs/InGaAs/GaAs core-multishell nanowire cavity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1072 ~ SC1072
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/acb657	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 Akamatsu Tomoya, Tomioka Katsuhiko, Motohisa Junichi	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 394003 ~ 394003
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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 国本 大雅、原 真二郎、本久 順一
2. 発表標題 GaAs/InGaAs/GaAsコアマルチシェルナノワイヤ共振器における軸対称偏光ビームの生成
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Junichi Motohisa
2. 発表標題 Generation of Vector Beams from Nanowires
3. 学会等名 WPI-MANA International Symposium 2022 Frontier of Materials Nanoarchitectonics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kunimoto, S. Hara, and J. Motohisa
2. 発表標題 Polarization States of Vector Beams Obtained from Core-Multishell Nanowires
3. 学会等名 The 41st Electronic Materials Symposium
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 国本 大雅、原 真二郎、本久 順一
2. 発表標題 GaAs/InGaAs/GaAsコアマルチシェルナノワイヤ共振器における中空ビームの生成
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 Taiga Kunimoto, Shinjiro Hara, Junichi Motohisa
2. 発表標題 Generation of Hollow Beam from GaAs/InGaAs/GaAs Core-multishell Nanowire Cavity
3. 学会等名 2022 International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taiga Kunimoto, Shizuka Obara, Shinjiro Hara, Junichi Motohisa
2. 発表標題 Polarization Analysis of Luminescence from GaAs/InGaAs/GaAs Core-multishell Nanowire Cavity",
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State Device and Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本久 順一, 富岡 克広
2. 発表標題 半導体ナノワイヤの成長とデバイス応用(チュートリアル)
3. 学会等名 第13回ナノ構造エピタキシャル成長講演会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 国本 大雅、本久 順一、原 真二郎
2. 発表標題 GaAs/InGaAs/GaAs コアマルチシェルナノワイヤ共振器における偏光状態の解析
3. 学会等名 第57回応用物理学会北海道支部・第18回日本光学回北海道支部合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 国本 大雅、本久 順一、原 真二郎
2. 発表標題 GaAs/InGaAs/GaAsコアマルチシェルナノワイヤ共振器における発光の解析
3. 学会等名 第69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 Tomoya Akamatsu, Masahiro Sasaki, Katsuhiko Tomioka, Junichi Motohisa
2. 発表標題 Control of the size and the emission wavelength in InP-based nanowire quantum dots
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020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 熱アニールによるInP/InAsPヘテロ構造ナノワイヤのサイズ制御と発光ダイオード応用
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 小原 康, 富岡 克弘, 原 真二郎, 本久 順一
2. 発表標題 GaAs/InGaAs/GaAsコアマルチシェルナノワイヤ共振器の発光特性
3. 学会等名 第56回応用物理学会北海道支部・第17回日本光学回北海道支部合同学術講演会
4. 発表年 2021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	富岡 克広  (Tomioka Katsuhiko)  (60519411)	北海道大学・情報科学研究院・准教授    (10101)	

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