

令和元年5月30日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04331

研究課題名(和文) 未踏光周波数帯域を開拓する広帯域偏波無依存光アンプ基盤技術の構築

研究課題名(英文) Development of high-gain, polarization-insensitive closely-stacked quantum dot optical amplifiers

研究代表者

喜多 隆 (Kita, Takashi)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：10221186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：光情報通信に利用可能な光周波数資源を大幅に拡大するためには1.0-1.3 micro-m帯における半導体光アンプ(SOA)技術を開発する必要がある。本研究では、この帯域で動作する入力光信号の偏波に依存しないSOAを開発した。われわれはInAs/GaAs量子ドットの応答波長を制御するとともに、量子ドット多層積層によってTM利得を増強して偏波無依存を実現した。最適設計したSOAを試作しfiber-to-fiber評価を行った結果、1.0-1.3 micro-m帯で動作するSOAデバイスが偏波無依存動作の指標とされる偏波利得差1dB以下で動作することを実証することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発する偏波無依存SOAは量子ドットでないと実現不可能で、量子ドットの有する低次元性と積層成長等の自在な構造制御を融合させている点でドットの量子機能を最大限に引き出しており、学術的に非常に重要な研究である。また、量子ドットのすぐれた波長制御性、偏波制御性を引出して従来の光通信帯域を大幅に拡張する世界で初めての高機能偏波無依存SOAの開発研究であり、その学術的成果は光再生中継に共通の課題を解決するものであり、光周波数資源の拡大とネットワークの効率的構築に向けて波及してゆく極めて意義のある研究である。

研究成果の概要(英文)：In order to extend the optical telecommunication band widths, it is essential to develop novel semiconductor optical amplifier (SOA) operating in the wavelength region of 1.0-1.3 micro-m. In this project, we developed polarization-independent SOA operating in the wide communication band. We controlled the operating wavelength of InAs/GaAs quantum dots and developed polarization-insensitive SOA by enhancing the TM gain in multilayered InAs/GaAs quantum dot structures. Based on the results, we processed optimized SOAs and conducted detailed fiber-to-fiber characterizations. According to these results, we succeeded in demonstrating polarization-insensitive SOAs with the polarization difference within 1dB in the wide 1.0-1.3 micro-m wavelength region.

研究分野：半導体電子工学

キーワード：薄膜 量子構造 量子ドット 光アンプ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光情報通信では多値・多重による大容量化と光周波数資源の拡大によって次世代の超大容量情報通信に対応しようとしている。本研究では、未開拓領域を含む 1.0~1.3 μm 帯に注目する。新たな帯域を含む広帯域ネットワークでは光源だけでなく光再生中継デバイスの実現が不可欠である。光信号の増幅という点では希土類添加ファイバーアンプが実用化されているが、帯域が狭く波長資源のごく一部しか使っていない。また、特に今回注目する波長 1.0 μm 帯は未開拓であり、入力信号の偏波に依存しない半導体光アンプ(SOA)の利用が期待されている。この新しく開拓する波長 1.0 μm 帯は、産業分野や光計測分野でも利用でき、さらには生体への透過特性を生かした医療診断機器への応用など新たな分野も切り開くと期待される。

2. 研究の目的

光情報通信に利用可能な光周波数資源を大幅に拡大し、効率的に利用するためには未開拓の 1.0~1.3 μm 帯におけるデバイス技術を開発する必要がある。本研究では、この帯域で動作する、入力光信号の偏波に依存しない SOA を開発する。縦/横偏波間の増幅率差の課題克服は SOA 実用化のカギを握っており、独自の InAs/GaAs 量子ドット多層積層によって TM 利得を増強して偏波無依存を実現する。動作波長の制御と高利得化によって 1.0~1.3 μm 帯の 70THz を超える帯域を 3 つの 30THz 級偏波無依存 SOA でカバーするとともに偏波無依存動作を実証して未踏光周波数帯域を開拓する光アンプ基盤技術を構築する。

3. 研究の方法

本研究では、未開拓の波長帯を含む 1.0~1.3 μm 帯において動作する偏波無依存 SOA デバイス技術を開発した。具体的には、GaAs(001)基板に InAs/GaAs 量子ドットを多層積層成長して TM 利得増強の実現をめざした。また、デバイス利得において広帯域で偏波利得差 1 dB 以下を実現し実用的な偏波利得差 1 dB 以下を実現するために、発光中心波長を制御した量子ドットの多層積層技術を構築して広帯域をカバーした。さらに、fiber-to-fiber の光データ伝送実験によって偏波無依存増幅利得特性を明らかにした。実施した具体的な内容は以下のとおりである。

(1) 量子ドットの発光波長制御と多層積層技術の確立

分子線エピタキシー(MBE)装置を用いて GaAs(001)基板に波長制御した InAs 量子ドット層を積層して成長した。

- 独自の GaAs 温度制御キャップ成長による 1.0~1.3 μm 帯域における発光波長の制御。
- 2 層目以降の InAs 供給量の精密制御による多層成長。
- 中間層厚 d の制御による波動関数の結合状態の制御、TM 成分増大による偏波制御。

(2) SOA デバイス構造の試作

p-i-n 構造における内部電界を考慮した積層量子ドット活性層を設計し、AlGaAs クラッド層で挟み込んだ SOA 素子を試作した。

- 光導波路特性のシミュレーションと伝搬モード解析。
- 伝搬損失を限界まで抑えた最適素子構造の設計。

(3) SOA 特性評価と光データ伝送実験

SOA デバイスの基礎特性を精密に評価して、下記に挙げた 1.0~1.3 μm 帯の 70THz を超える広帯域で動作する偏波無依存光アンプの基礎特性を明らかにした。

- 偏波利得の注入電流依存性。
- 偏波利得スペクトルの測定
- 偏波無依存化 (偏波利得差 1 dB 以下) の実証

4. 研究成果

(1) 量子ドットの発光波長制御と多層積層技術の確立

反射高速電子線回折 (RHEED) を用いることで試料作製時の表面の結晶構造をリアルタイムでその場観察することができる。GaAs キャップ層を成長することで InAs 量子ドットが埋め込まれ成長表面が平坦化し 2 次元化すると (004) 回折点強度は減衰する。図 1 は GaAs キャップ層成長時の (004) 回折点強度の時間変化を成長した GaAs キャップ層の膜厚に変換しグラフ化したものである。GaAs キャップ層成長温度が高くなるにつれて InAs 量子ドットが埋め込まれる膜厚が減少している。これは InAs 量子ドットと GaAs キャップ層界面で In と Ga 原子の intermixing が促進され量子ドットのサイズが減少しているためである。このように、キャップ層成長温度によって量子ドットサイズが変化することによって発光波長は大きく変化する。図 2 にその結果を示す。GaAs キャップ成長温度の制御によって 1.0~1.3 μm 帯域をカバーする量子ドットを実現することができた。

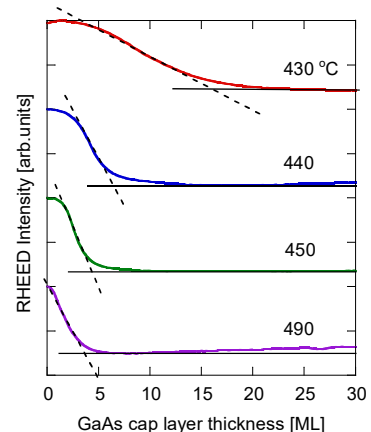


図 1 GaAs cap 層厚による(004)回折点強度の変化

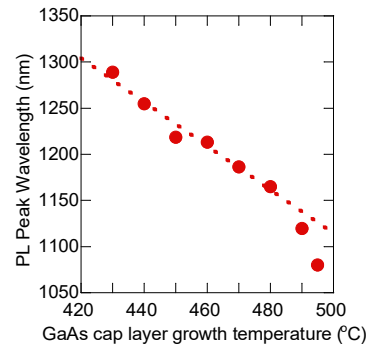
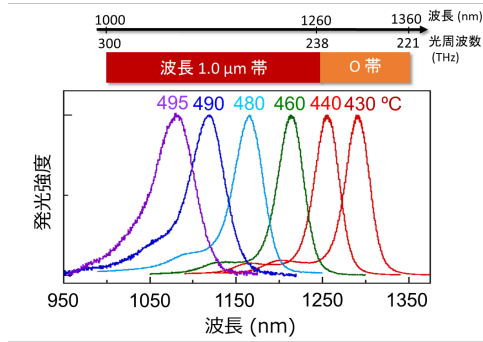


図2 室温でのInAs量子ドットの(a)発光スペクトルと(b)発光ピーク波長のGaAsキャップ層成長温度依存性。

量子ドットを積層して成長すると図3のように柱状に整列して成長する。今回の研究では異なる温度でInAs/GaAs量子ドットを多層積層した、詳細な実験の結果、図4のように量子ドットの高さプラス1nmの厚さのキャップ層を成長させるとどの温度でも図3のようなきれいな積層が実現できることを世界で初めて発見した。

これを利用すると成長方向に平行な偏波成分であるTM偏波成分が強くなり。TEとTMがバランスするところで偏波無依存となる。積層数が増して量子ドットの有効高さが伸びると閉じ込めが弱まり、重い正孔と軽い正孔バンドのミキシングが生じる。高さ方向の閉じ込めの弱まりとともに[001]成分が増強され、ミキシングにより面内方向の閉じ込めの違いが遷移確率に影響を及ぼすようになる。面内方向では量子ドット形状の面内異方性のために相対的に閉じ込めの弱い[-110]成分が閉じ込めの強い[110]成分よりも顕著になり、面内偏光の異方性が顕在化することになる。これは、積層方向の電子状態の長大化が面内偏光異方性を増強させることを意味している。また、量子ドットがある高さまで積層されると積層方向の[001]成分は、まず面内方向の[110]成分を超え、さらに積層すると[-110]成分を超えることになる。

(2) SOA デバイス構造の試作

本研究ではリッジ型の導波路構造を持つ量子ドットSOAデバイスを作製した。リッジ型導波路は材料の表面に凸形の部分を微細加工で設けて、その部分の等価屈折率が周辺に比べて大きくすることで導波しようとするもので、作製が容易である。導波路解析では、GaAs活性層の膜厚は400 nm、屈折率は3.431、AlGaAsクラッド層と絶縁層の屈折率はそれぞれ3.314と1.5、導波する光の波長は1.15 μmとした。この解析より、リッジ幅が大きいほどモード数が多くマルチモードになり、リッジ幅が小さいほどモード数が少なく、シングルモードに近づいていることが明らかになった。本研究で作製したデバイスは、5 μmを選択した。リッジ幅5 μmの場合、TEモードにおいて $m=0\sim3$ の4つのモード、TMモードにおいて $m=0\sim4$ の5つのモードが存在している。

デバイス加工プロセスは主に以下のとおりである：

1. リッジの形成：ウェットエッチングによりキャップ層・クラッド層を深さ0.8 μm除去し、リッジ幅5 μmのリッジ導波路構造を作製した。
2. 絶縁膜、保護膜の形成：リッジ形成時にエッチングされた部分へ絶縁物質を埋め込むことで、リッジ上部から注入されたキャリアが効率よく活性層に届くようにした。また、リッジ部分よりも屈折率の小さな物質を埋め込むことで、リッジ部分に光が閉じ込められるようにした。本試料ではSiO₂を埋め込んだ後、絶縁樹脂としてベンゾシクロブテン樹脂を埋め込み、表面の平坦化を行った。
3. 電極形成：本試料ではオーミック接触を取るために、Ti/Pt/Auの多層膜構造にした。

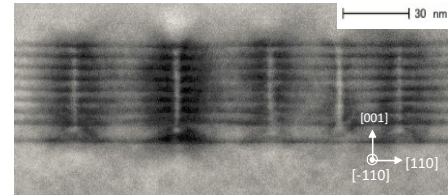


図3 InAs/GaAs自己形成量子ドットの制御の一例。

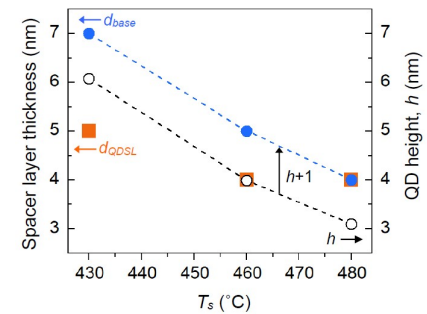


図4 異なる成長温度での多層積層条件。

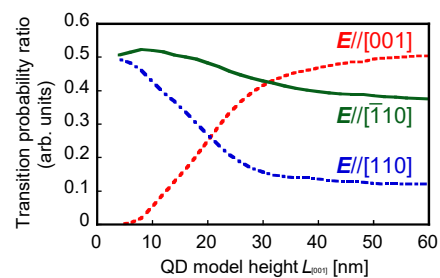
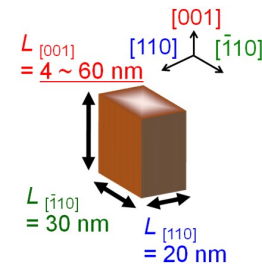


図5 遷移確率の積層方向高さ依存性。

4. マウント/ボンディング：デバイス加工を行ったデバイスを図 6 のように金属のステムの上に電極部をマウントし、Au 細線によりもう片方の電極部へワイヤボンディングを行った。

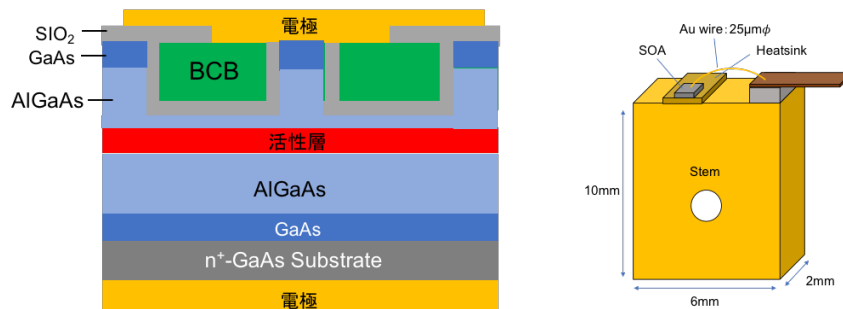


図 6 デバイス加工後とマウント/ボンディング後のデバイスの概略図

導波路方向は[110]方向とした。これは [-110]と[001]方向の偏光を利用した場合のデバイスであり、デバイス端面からの発光を観察した際、[-110]が TE 成分、[001]が TM 成分になる。デバイス端面は無反射(Anti reflection: AR)コーティングを行い、進行型増幅器とした。AR コーティングを施しているため、デバイス端面における入射光の損失が抑えられている。また、デバイスの長さは 1 mm とした。

(3) SOA 特性評価と光データ伝送実験

図 7 に作製したデバイスの TE, TM の偏光エレクトロルミネッセンス (EL) スペクトルと偏光度の注入電流量依存性を示す。40 層の近接積層量子ドットによって TM 成分の発光を得ることができている。注入電流量を増加していくと、EL スペクトルのピーク波長が短波長側へシフトしている。これはキャリア注入量が増加することにより準位が基底準位から励起準位、ならびにサイズの小さな量子ドットの基底準位へと埋まっていくことによる state-filling 効果である。また、TE 成分と TM 成分の偏光度の比(Polarization difference: PD)は電流量の増加により増大し、TE 成分の寄与が大きくなっている。これも励起準位による発光が影響していると考えられる。積層量子ドットのシステム全体の振動子強度は基底準位、励起準位の全ての準位トータルで考えると TE, TM で同じであるために基底準位で TM dominant な発光をしている場合、励起準位では TE dominant になる。よって短波長側の励起準位では TE 成分の寄与が大きくなっており、電流量増加によって TE 成分がさらに大きくなっている。

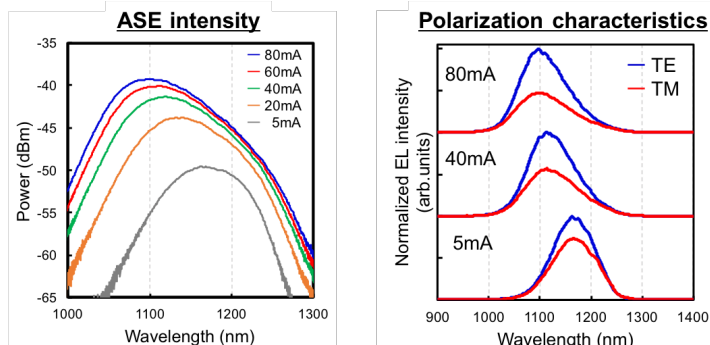


図 7 偏光 EL スペクトルと偏光度の注入電流量依存性。

作製したデバイスの利得特性評価をするために、Fiber-to-fiber 測定系 (図 8) においてデバイスにある特定の波長の光を入射させて、デバイスからの出射光を検出した。TE 偏光、TM 偏光のそれぞれに対する利得を比較することにより、EL 測定系と同様にペルチェ素子を用いて、デバイス温度は 20 °C程度 (室温) とした。入射光は白色パルスレーザを用いた。そのレーザ光を分光器により分光し、特定の波長のみの光を取り出してファイバに集光した。TE 偏光または TM 偏光のみの入射光とするために偏波コントローラを用いた。

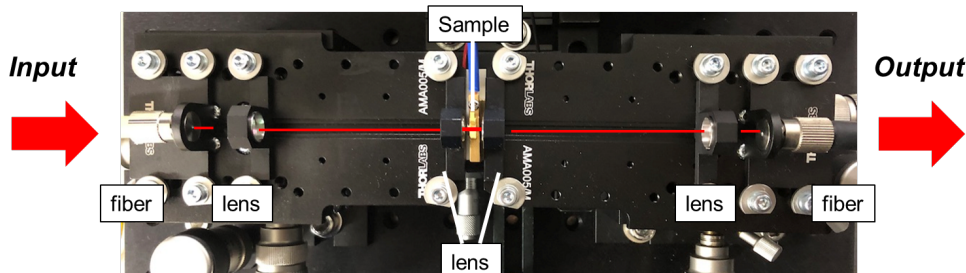


図 8 Fiber-to-fiber 測定系。

図9は波長 1100 nm, -33 dBm, TE 偏光または TM 偏光を入射光としたときの Fiber-to-fiber 偏光依存利得(Polarization-dependent gain: PDG)の注入電流量依存性を示す。これはパワー-33 dBm の入射光に対する増幅率の偏光度の比を示している。0 mA つまり入射光の損失は、TM 偏光より TE 偏光の方が大きくなった。これは量子ドットが扁平な形状していることやこの量子ドット SOA が TE 支配的な発光特性を示すため、入射光の TE 成分の量子ドットによる吸収が大きいことなどが考えられる。注入電流を増加していくと、TE 成分の利得がより増加していき、~10 mA において TE と TM の利得が同程度の偏波無依存な PDG が得られた。さらに電流を増加していくと、TE 成分の利得の方が大きくなっていく。TE 偏光入射の方がより電流量増加に伴う利得の増加量が大きい。注入電流が大きいと励起準位において TE 成分の発光が TM 成分に比べて相対的に大きくなっていくためである。注目すべきは、ほぼどの電流注入条件でも偏波利得差 1 dB 以下を実現していることである。また、利得スペクトルにおいても図 10 のように量子ドットの不均一拡がりのために広帯域で偏波利得差 1 dB 以下を実現できることが明らかになった。このような偏波特性は、今回実現している他の波長帯で動作する量子ドット SOA においても確認できており、1.0~1.3 μm 帯をカバーする波長帯域で動作する偏波無依存 SOA デバイス実現することに成功した。

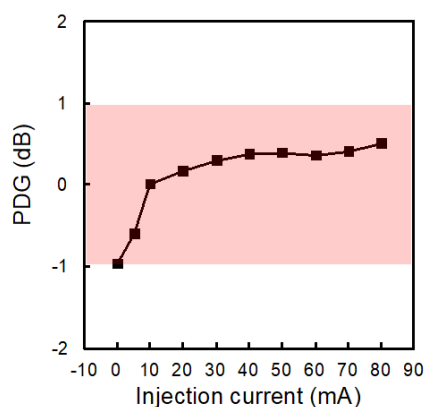


図9 Fiber-to-fiber 利得の注入電流量依存性。

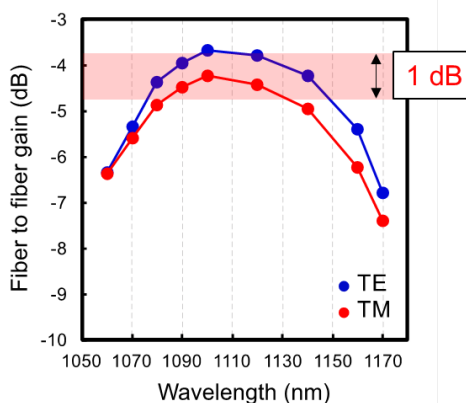


図10 Fiber-to-fiber 利得スペクトル。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

1. R. C. Plantenga, V. R. Kortan, T. Kaizu, Y. Harada, T. Kita, M. E. Flatté, and P. M. Koenraad “Spatially Resolved Electronic Structure of an Isovalent Nitrogen Center in GaAs” (Phys. Rev. B, Vol. 96, 155210-1~8, 2017. 10)
 2. K. Hirao, S. Asahi, T. Kaizu, and T. Kita “Two-Step Photocurrent Generation Enhanced by the Fundamental-State Miniband Formation in Intermediate-Band Solar Cells Using a Highly Homogeneous InAs/GaAs Quantum-Dot Superlattice” (Applied Physics Express, Vol. 11, No. 1, 012301-1~4, 2017. 11)
 3. T. Tanibuchi, T. Kada, S. Asahi, D. Watanabe, T. Kaizu, Y. Harada, and T. Kita “Photocarrier Transport Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells Using Time-of-Flight Spectroscopy” (Phys. Rev. B, Vol. 94, 195313 -1~9, 2016. 11)
 4. M. Suwa, T. Andachi, T. Kaizu, Y. Harada, and T. Kita “Polarization Characteristics of Electroluminescence and Net Modal Gain in Highly Stacked InAs/GaAs Quantum-Dot Laser Devices” (J. Appl. Phys. Vol. 120, 134313-1~6, 2016. 10)
 5. T. Kaizu, K. Taguchi, and T. Kita “Emission-Wavelength Tuning of InAs Quantum Dots Grown on Nitrogen- δ -Doped GaAs(001)” (J. Appl. Phys. Vol. 119, 194306-1~8, 2016. 5)
- 他 2 件

[学会発表] (計 39 件)

1. 海津利行、喜多隆“近接積層 InAs/GaAs 量子ドット超格子の 1 次元電子状態の測定温度依存性” (第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学、2019. 3. 9-12)
2. T. Kaizu, T. Koike, and T. Kita “Multiple Stacking of Capping Temperature-Controlled InAs/GaAs Quantum Dots with AlGaAs Barrier Layers for Broadband Emission” (Compound Semiconductor Week 2018, Cambridge, MA, USA, May 29-June 1, 2018)
3. T. Kaizu, K. Hirao, and T. Kita “One-Dimensional Electronic States in Closely Stacked InAs/GaAs Quantum Dots with Different Growth Temperatures” (International Conference on Nanophotonics and Nano-optoelectronics 2018, ICNN2-4, Yokohama, April 25-27, 2018)
4. 海津利行、小池孝彰、喜多隆“AlGaAs 障壁層を挿入した波長制御 InAs/GaAs 量子ドットの積層成長” (第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学、2018. 3. 17-20)
5. T. Kaizu, Y. Tajiri, and T. Kita “Broadband Control of Polarization Characteristics in

Closely-Stacked InAs/GaAs Quantum Dots” (Compound Semiconductor Week 2017 , Berlin, B2.5, May 14-18, 2017)

6. 中廣光、海津敏行、喜多隆、赤羽浩一“InAs/GaAs 量子ドット超格子を用いた偏波制御型半導体光増幅デバイス基礎特性”(平成29年度半導体エレクトロニクス部門委員会 第1回研究会、和歌山大学、2017. 7. 15)
7. Y. Harada, J. Yamada, D. Watanabe, S. Asahi, and T. Kita “Polarization-Insensitive Intraband Transition in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices” (UK Semiconductors 2016 , Sheffield, D-O-3, July 6-7, 2016)
8. T. Kaizu, M. Suwa, T. Andachi, Y. Harada, and T. Kita “Polarization Anisotropy of Electroluminescence and Net-Modal Gain in Highly Stacked InAs/GaAs Quantum-Dot Laser Devices” (2016 Compound Semiconductor Week (CSW2016) , Toyama, MoP-ISCS-036, June 26-30, 2016)
9. Y. Tajiri, T. Kaizu, and T. Kita “GaAs First-Spacer-Layer Thickness Dependence of Polarized Photoluminescence Properties of Closely-Stacked InAs/GaAs Quantum Dots with Long-Wavelength Emission” (2016 Compound Semiconductor Week (CSW2016) , Toyama, WeD2-2, June 26-30, 2016)
10. 海津利行、田尻祐介、喜多隆“近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの GaAs スペーサ層膜厚と成長温度による広帯域偏光特性制御 (2) ”(第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜、 2017. 3. 14-17)
11. 海津利行、田尻祐介、喜多隆“近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの GaAs スペーサ層膜厚と成長温度による広帯域偏光特性制御”(第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、16a-B9-10、2016. 9. 13-16)

他 28 件

〔図書〕(計 0 件)

〔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：<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-photonics/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：海津 利行

ローマ字氏名：(KAIZU, toshiyuki)

所属研究機関名：神戸大学

部局名：研究基盤センター

職名：助教

研究者番号(8桁)：00425571

研究分担者氏名：原田 幸弘

ローマ字氏名：(HARADA, yukihiro)

所属研究機関名：神戸大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号(8桁)：10554355

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：赤羽 浩一

ローマ字氏名：(AKAHANE, koichi)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。