

令和元年6月25日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03858

研究課題名(和文) InAs量子ドットを用いた超広帯域近赤外波長掃引光源の開発とOCTへの応用

研究課題名(英文) Development of ultra-wide band near-infrared wavelength swept light source using InAs quantum dots and its application to OCT

研究代表者

尾崎 信彦(Ozaki, Nobuhiko)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：30344873

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高分解能かつ高深達度の光干渉断層計(OCT)を実現すべく、自己組織化InAs量子ドット(QD)という半導体ナノ材料を用いた近赤外広帯域光源開発を行った。InAs-QDはGaAs基板上へのInAs成長時に格子歪によって自己組織的に形成されるナノサイズの3次元構造であり、一定のサイズ分布による広帯域な発光および光利得を、生体内透過率の高い近赤外波長帯で示す。この特長を活かし、InAs-QDを光学利得媒体とした広帯域な波長可変レーザー光源を開発し、波長掃引型OCT光源とすることで、高分解能と高深達度を両立するOCTの可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって開発された自己組織化InAs量子ドットベースの波長掃引光源(SS)およびその光源を用いたSS-OCTは、既存のOCTでは困難であった高分解能と高深達度の両立の可能性を示した。この成果により、今後、従来のOCTを超えた性能を有する医療診断ツール開発や、半導体ベースの光源を活かした小型・軽量のOCTの開発などの新たな応用展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：We have developed a tunable laser based on self-assembled InAs quantum dots (QDs) for swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) applications. Self-assembled InAs QDs grown on GaAs have an inherent size distribution resulting in a near-infrared broadband gain spectrum; thus, the QD-based tunable laser is suitable for application to SS-OCT light sources realizing high axial resolution and large imaging depth. We fabricated a tunable laser based on InAs QDs and demonstrated its effectiveness in OCT applications in terms of high-axial-resolution and large imaging depth.

研究分野：結晶工学、ナノ構造、光学応用

キーワード：量子ドット 分子線エピタキシー 近赤外光源 光コヒーレンストモグラフィ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光コヒーレンストモグラフィー(OCT)[1]は、近赤外光を用いた非侵襲な生体断層イメージング技術であり、生体への負荷が少なく、システムの小型化が可能、といったメリットから、眼科臨床を皮切りに現在では広範囲な医療分野へ拡がりつつある[2]。例えば循環器においては心臓カテーテルに光ファイバーを導入し、冠動脈内部から光を照射して動脈壁の内部断層を観察可能な OCT が実用化されており、心筋梗塞の原因となる病変(プラーク)の観察や、術後経過の診断などへ活用されている[3]。しかしながら、現状の OCT 画像の分解能は 10–15  $\mu\text{m}$ 、画像取得範囲(深達度)は 2 mm 程度であり、これらの性能ではまだ十分な診断技術とは言えず、より高分解能かつ高深達度を有する OCT の開発が望まれている。

OCT は、図 1 に示すように光の干渉を利用して対象サンプルの断層像を得る。光源に低コヒーレンス(様々な波長の光を含むスペクトル帯域の広い)光源を用いる点が特徴であり、低コヒーレンス光を二分岐してサンプルと参照ミラーに入射し、それぞれの反射光を干渉させることで、サンプル内の光軸上の局所領域の反射率(屈折率)分布を干渉光強度として測定できる。光軸をサンプル面内で走査し、反射率分布を輝度の違いとして描画すれば OCT 画像が取得できる。OCT 画像の分解能は干渉を起こす局所領域の長さ(コヒーレンス長:  $l_c$ )によって決まり、光源のスペクトル帯域  $\Delta\lambda$  に反比例して分解能が向上する。また、深達度はサンプル内への光の浸透長で決まるので、光源が持つ強度および観察対象物の光吸収波長特性に依存する。医療用途 OCT では、生体の主構成元素であるヘモグロビンと水の光吸収が共に最小となる近赤外波長(1~1.3  $\mu\text{m}$ )において高い浸透長が得られるとされている[4]。従って、OCT の高分解能と高深達度を実現するには、広帯域かつ高強度な近赤外光源の開発が重要となる。

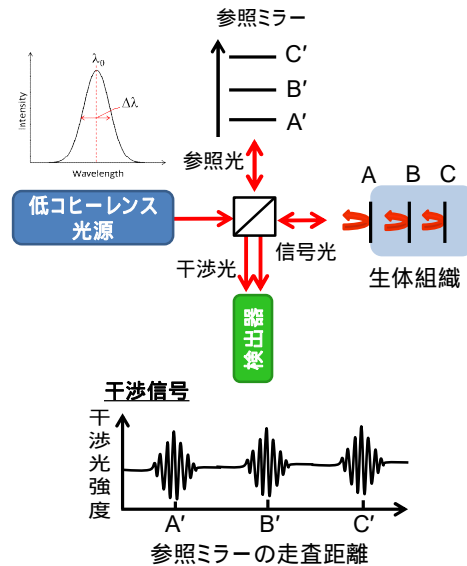


図 1 OCT 原理模式図

### 2. 研究の目的

本研究は、背景で述べた高分解能かつ高深達度 OCT を実現すべく、自己組織化 InAs 量子ドット(QD)[5]という半導体ナノ材料を用いた近赤外広帯域光源開発を行い、特に広帯域な波長可変レーザー光源の実現を目指した。InAs-QD は GaAs 基板上に異なる格子定数を持つ InAs をエピタキシャル成長させる際に、格子歪誘起によって自然発生的に形成されるナノサイズの 3 次元構造である。自己組織化による一定のサイズ分布を持つため、量子サイズ効果によって様々な発光波長を有する集合体として広帯域な発光スペクトルを示しやすく、発光波長が生体内を透過しやすい近赤外波長帯という利点を持ち合わせている。我々はこれまでに InAs-QD 層を用いた広帯域な近赤外光源の開発に成功しており[6,7]、QD ベースの広帯域光源を利得媒体とした波長掃引レーザー光源(SS: Swept-Source)を開発すれば、広帯域な波長掃引による高分解能と、レーザー光による高深達度を両立した OCT システムの実現が見込まれる。

### 3. 研究の方法

広帯域な利得媒体として、GaAs 基板上に自己組織的に成長した InAs-QD を含む電流注入型光学利得チップの作製を行った[8]。図 2 (a)に利得チップの断面模式図を示す。分子線エピタキシー法により、p-i-n 接合 AlGaAs/GaAs 内に InAs-QD を 4 層積層成長した基板を作製した。QD を含む GaAs 層(240nm 厚)を導波層とし、AlGaAs クラッド層(1.5  $\mu\text{m}$  厚)で挟むことで、光閉じ込めとキャリア閉じ込めを実現している。この基板に対し、半導体微細加工によってリッジ型導波路(RWG)を形成後、劈開により端面出射型の利得チップ(2  $\times$  6 mm<sup>2</sup>)を作製した。RWG の高さは約 1.4  $\mu\text{m}$  であり、形状は図 2 (b)に示すように片側端面に対し約 7 度傾斜させた J 字型とした。この導波路形状によって傾斜側の端面反射率が低減され、内部レーザー発振(Fabry-Perot レーザー)が抑制されることで、注入電流量増加によって広帯域な増幅光(Amplified Spontaneous Emission)が得られるようにした。

利得チップを熱電クーラー(TEC: Thermoelectric-cooler)により一定温度(15°C)に制御し、パルス電流を与えた。図 2 (c)に示すように、傾斜側の端面から出射した発光を先球レンズ光ファイバーで Littrow 配置にした回折格子へ導き、特定波長の回折光を同じファイバーを通してチップに光帰還させた。回折格子の角度を変更して様々な波長の光を帰還させ、反対側の端面から得られる発振スペクトルを様々な電流値で測定した。

さらに、Spectral-Domain (SD)および Swept-source (SS)方式の OCT を立ち上げ、作製した QD 光源を導入して、それぞれの点拡がり関数(PSF)計測による深達度の評価を行った。

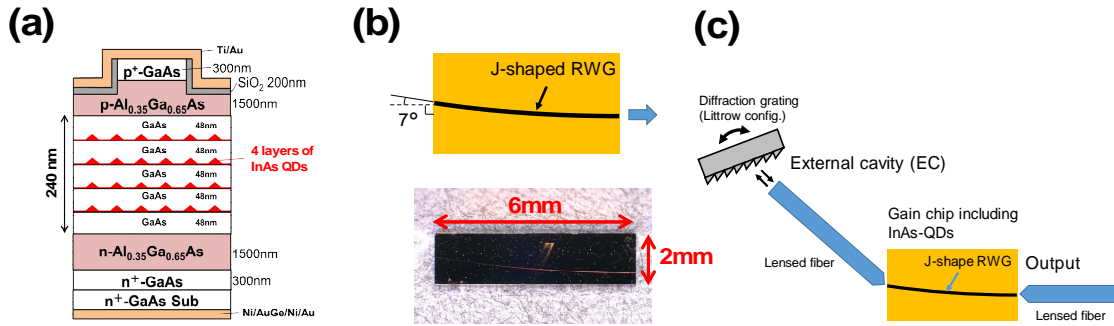


図2 (a)作製した QD 利得チップの断面模式図 (b)利得チップに形成した RWG の模式図(上)と作製したチップ写真(下) (c)利得チップに対し外部共振器に導入した実験系の模式図

#### 4. 研究成果

##### (1) 量子ドットを用いた波長可変レーザーの実現

図3に、注入電流量に対する利得チップからの EL スペクトル例を示す。100 mA 以下の低電流注入時は波長約 1.17  $\mu\text{m}$  をピークとする QD の基底準位間発光が現れ、その後電流値を増加してもレーザー発振は起きず、波長約 1.1  $\mu\text{m}$  付近の高次準位間発光強度が増大し、スペクトルの広帯域化が確認された。これは RWG を J 字形状とすることで、内部発振が抑制され、より高次の準位間発光が寄与する state-filling 効果が表れた結果と考えられる[7]。この利得チップを外部共振器に導入し、広帯域発光の中の特定波長の光を回折格子で光帰還させると、レーザー発振が得られた。図4に、外部共振器の導入による注入電流対光出力 ( $L-I$ ) 特性変化を示す。外部共振器がない場合 (黒線) は、注入電流量に対し超線形の緩やかな出力増加を示している (増幅光強度変化) のに対し、外部共振器を導入した場合 (赤線) は、閾値電流 (この場合は約 300mA) 以上で急激な出力増加が発生し、レーザー発振が起きたことを示している。

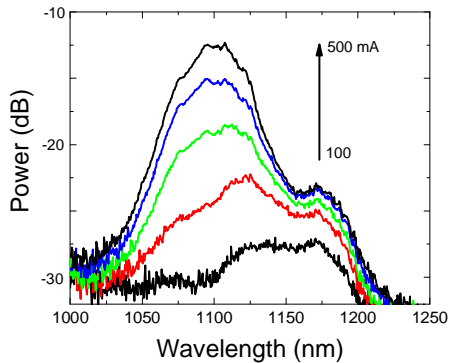


図3 QD からの広帯域 EL 発光の例

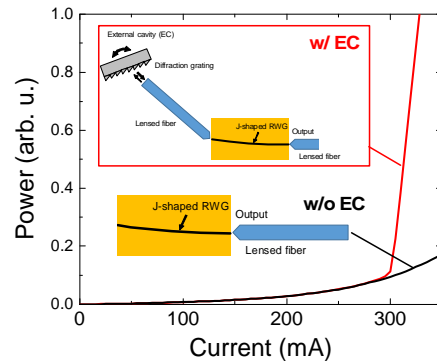


図4 外部共振器による  $L-I$  特性変化

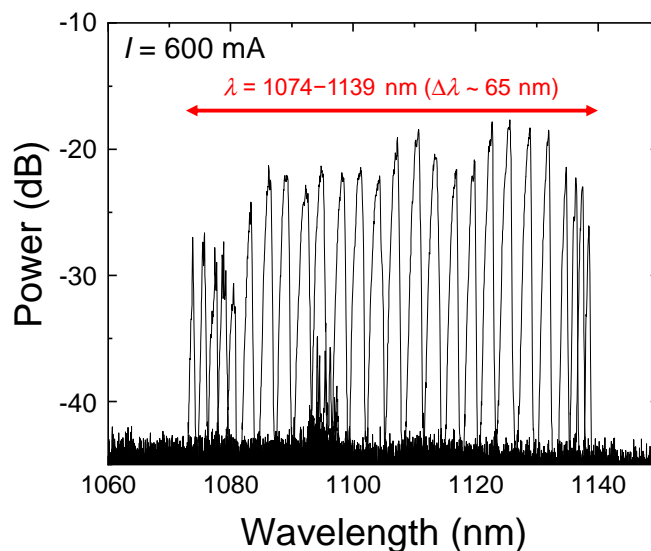


図5 各注入電流量におけるレーザー発振スペクトルと波長可変範囲の変化[8]

さらに、外部共振器の回折格子の角度変化により、レーザー発振波長が変化することも確認した。図5にその一例を示すが、レーザー発振の波長可変帯域は、注入電流値の増加に伴って拡大し、 $I = 600 \text{ mA}$  で波長可変帯域約  $65 \text{ nm}$  が得られた。仮にこの波長掃引光源を SS-OCT に導入すれば分解能は約  $8 \mu\text{m}$  と見積もられ、既存の SS-OCT の分解能 ( $10\sim 20 \mu\text{m}$ ) を上回る性能が期待できる。以上の結果から、InAs-QD による広帯域な波長可変レーザー光源 (QD-SS) が得られ、高分解能 SS-OCT 光源応用の可能性が示された。

## (2) 画像深さの拡大

次に、開発した QD-SS を導入した OCT を立ち上げ、深達度の性能評価を行った。構築した SS-OCT システムの模式図を図 6 (a) (上) に示す。サンプルミラーを光軸 ( $z$  軸) 上に設置し、光源波長を掃引しながら参照ミラーとサンプルミラーからの反射光による干渉光強度変化を時間領域でフォトダイオードによって検出し、得られた干渉強度変化を周波数領域にリサンプリングして逆フーリエ変換を行うことで、サンプルミラーの反射位置を表す  $z$  軸上の反射光強度分布を取得した。次に、QD-SS に外部共振器を設置せず、広帯域な増幅光源 (QD-SLD) としたものを干渉計に導入し、両ミラー間の反射光干渉スペクトルを取得する SD-OCT 方式 (図 6 (a) 下) によって反射光強度分布測定を行い、サンプルミラーの位置を  $z$  軸上で変えながら SS, SD 両方式で得られた反射光強度を比較した。図 6 (b) に、SS, SD 両方式で得られたミラー位置を表す各ピーク強度を、 $z = 0.1 \text{ mm}$  位置のピーク強度で規格化し、それぞれプロットした結果を示す。SS-OCT (○) の方が、ピーク強度低下が緩やかになっており、 $-6 \text{ dB}$  低下までの距離を比べると、SD-OCT (□) に対して約 7.5 倍に拡張されていることを確認した。この結果から、QD ベースの波長掃引レーザー光源による深達度拡大が確認された。

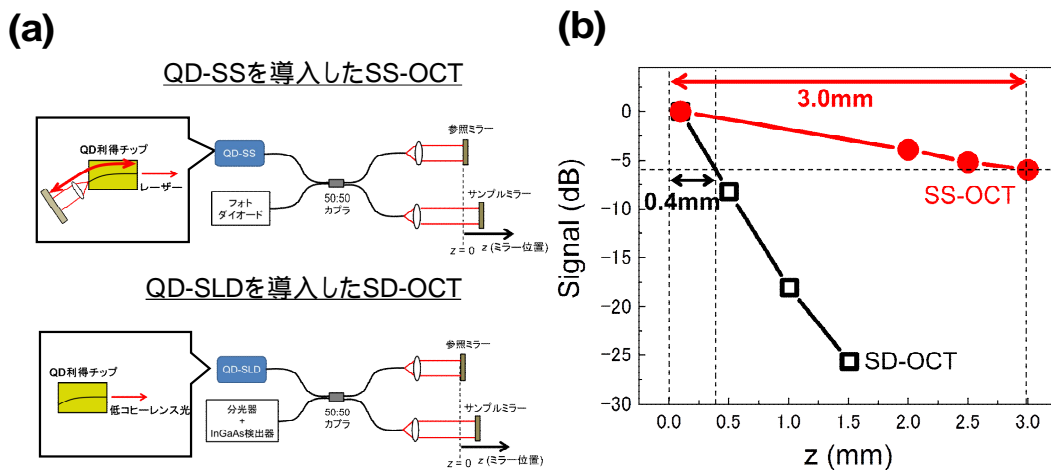


図 6 (a) QD-SS を導入した SS-OCT (上) と、同じ利得チップを広帯域光源とした SD-OCT (下) セットアップの模式図 (b) 両 OCT による深達度の比較結果

以上の研究成果から、当初の研究目的である高分解能かつ高深達度 OCT を実現する自己組織化 InAs-QD を用いた波長掃引光源開発が示された。今後、この光源を用いた新たな OCT の開発が期待される。

## < 引用文献 >

- [1] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto, *Science* **254** 1178 (1991).
- [2] M. E. Brezinski, *Optical Coherence Tomography: Principles and Applications* (Academic Press, 2006).
- [3] T. Kubo, T. Akasaka, "Visualization of Atherosclerotic Coronary Plaque by Using Optical Coherence Tomography", in *Multi-Modality Atherosclerosis Imaging and Diagnosis*, 1st edition, edited by L. Saba, J. M. Sanches, M. N. Pedro and J. S. Suri, Springer-Verlag, USA, pp.377-384 (2013).
- [4] E. Salomatina and A. N. Yaroslavsky, *Phys. Med. Biol.* **53**, 2797 (2008).
- [5] *Self-Assembled Quantum Dots*, Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology Series Vol. 1, Z. M. Wang ed. (Springer, 2008).
- [6] N. Ozaki, T. Yasuda, S. Ohkouchi, E. Watanabe, N. Ikeda, Y. Sugimoto, and R. A. Hogg, *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 04EG10 (2014).
- [7] N. Ozaki, D. T. D. Childs, J. Sarma, T. S. Roberts, T. Yasuda, H. Shibata, H. Ohsato, E. Watanabe, N. Ikeda, Y. Sugimoto, and R. A. Hogg, *J. Appl. Phys.* **119**, 083107 (2016).
- [8] N. Ozaki, D. Childs, A. Boldin, D. Ikuno, K. Onoue, H. Ohsato, E. Watanabe, N. Ikeda, Y. Sugimoto, and R. Hogg, *Proc. SPIE* **10939**, 1093911 (2019).



## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計5件)

1. Nobuhiko Ozaki, Sho Yamauchi, Yuma Hayashi, Eiichiro Watanabe, Hirotaka Ohsato, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, Kenji Furuki, Yoichi Oikawa, Kunio Miyaji, David T. D. Childs, and Richard A. Hogg, "Development of a broadband superluminescent diode based on self-assembled InAs quantum dots and demonstration of high-axial-resolution optical coherence tomography imaging", J. Phys. D: Appl. Phys. **52**, 225105 1-9 (2019). (査読あり) DOI: 10.1088/1361-6463/ab0ea5
2. Nobuhiko Ozaki, David Childs, Aleksandr Boldin, Daigo Ikuno, Katsuya Onoue, Hirotaka Ohsato, Eiichiro Watanabe, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, and Richard Hogg, "Tunable external cavity laser diode based on wavelength controlled self-assembled InAs quantum dots for swept-source optical coherence tomography applications at 1100 nm wavelength band", Proc. SPIE **10939**, 1093911 1-6 (2019). (査読あり) DOI: 10.1117/12.2509984
3. Nobuhiko Ozaki, Shingo Kanehira, Yuma Hayashi, Shunsuke Ohkouchi, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, and Richard A. Hogg, "Growth of quantum three-dimensional structure of InGaAs emitting at  $\sim 1 \mu\text{m}$  applicable for a broadband near-infrared light source", J. Cryst. Growth **477**, 230-234 (2017). (査読あり) DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2016.11.104
4. 尾崎 信彦「自己組織化 InAs 量子ドットを用いた近赤外広帯域光源 高分解能光コヒーレンストモグラフィーへの応用」月刊オプトロニクス 36巻, 422号 pp.101-106 (2017年2月) (査読無し)
5. Yuma Hayashi, Nobuhiko Ozaki, Shunsuke Ohkouchi, Hirotaka Ohsato, Eiichiro Watanabe, Naoki Ikeda, and Yoshimasa Sugimoto, "Emission wavelength variation of InAs quantum dots grown on GaAs using As<sub>2</sub> molecules in molecular beam epitaxy", Extended abstracts of the 43<sup>rd</sup> International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2016), MoP-ISCS-037 p.1-2 (2016). (査読無し) DOI: 10.1109/ICIPRM.2016.7528627

### 〔学会発表〕(計24件)

#### 【招待講演】

1. 尾崎 信彦「InAs 量子ドットを用いた波長掃引光源開発と SS-OCT への応用」第 21 回光科学若手研究会 (I-site なんば) 2018 年 11 月 24 日
2. 尾崎 信彦「自己組織化 InAs/GaAs 量子ドットを用いた近赤外広帯域光源デバイス開発と光コヒーレンストモグラフィーへの応用」応用物理学会関西支部平成 30 年度第 1 回講演会「ナノ物性・ナノ構造デバイス研究の最前線～関西若手研究者からの情報発信～」(神戸大学瀧川記念学術交流会館) 2018 年 5 月 11 日
3. 尾崎 信彦「自己組織化 InAs 量子ドットを用いた近赤外広帯域光源開発と OCT 応用」徳島大学大学院理工学研究部フロンティア研究センター講演会 (徳島大学常三島キャンパス) 2017 年 11 月 20 日
4. Nobuhiko Ozaki, Yuma Hayashi, Shunsuke Ohkouchi, Hirotaka Ohsato, Eiichiro Watanabe, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, "InAs/GaAs quantum dots grown using As<sub>2</sub> source in molecular beam epitaxy for near-infrared broadband light source application", The Collaborative Conference on Crystal Growth (EMN 3CG 2017), Aug. 10th, Berlin, Germany, Aug. 7-11, 2017.
5. Nobuhiko Ozaki, "High axial resolution imaging of OCT using a broadband NIR superluminescent diode based on self-assembled InAs quantum dots", The 2016 Int. Symp. Adv. Mat. Res. (ISAMR 2016), Aug. 12th, Sun Moon Lake, Taiwan, Aug. 11-14, 2016.

#### 【国際会議】(以下の他に全7件)

1. Nobuhiko Ozaki, David Childs, Aleksandr Boldin, Daigo Ikuno, Katsuya Onoue, Hirotaka Ohsato, Eiichiro Watanabe, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, and Richard Hogg, "Tunable external-cavity laser diode based on self-assembled InAs quantum dots for swept-source optical coherence tomography applications at 1100 nm", SPIE Photonics West 2019, 10939-36, San Francisco, CA, U.S.A., Feb. 6th, 2019.
2. N. Ozaki, S. Kanehira, S. Ohkouchi, H. Ohsato, E. Watanabe, N. Ikeda, Y. Sugimoto, "InGaAs Layers Grown on GaAs with Optimized Growth Conditions to Obtain Broadband Emission Spectra Centered at 1.05  $\mu\text{m}$ ", 20th Int. Conf. Molecular Beam Epitaxy (MBE2018), Tu-A1-5, Shanghai, China, Sep. 2nd-7th, 2018.
3. S. Yamauchi, H. Shibata, N. Ozaki, N. Ikeda, Y. Sugimoto, K. Furuki, Y. Oikawa, K. Miyaji, D. T. D. Childs, and R. A. Hogg, "High-axial-resolution Optical Coherence Tomography Imaging Using Broadband Superluminescent Diodes Based on Self-assembled InAs Quantum Dots", The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24), P6-02 (Aug. 22nd), Tokyo, Japan, Aug. 21st-25th, 2017.
4. N. Ozaki, S. Kanehira, Y. Hayashi, S. Ohkouchi, N. Ikeda, Y. Sugimoto, "High-Intensity and Broadband Emission Centered at  $\sim 1 \mu\text{m}$  from InGaAs 3D Nanostructures Formed by High-Temperature Molecular-Beam-Epitaxy Growth", Mo-P-68 (Sep. 5th), 19th Int. Conf. Molecular Beam Epitaxy (MBE2016), Montpellier, France, Sep. 4-9th, 2016.

【国内学会】(以下の他に全 12 件)

1. 尾崎 信彦、David Childs、Aleksandr Boldin、生野 大吾、尾上 克也、大里 啓孝、渡辺 英一郎、池田 直樹、杉本 喜正、Richard Hogg「発光波長制御 InAs 量子ドットを用いた 1.1 $\mu$ m 帯外部共振器型波長可変レーザー」第 66 回応用物理学会春季学術講演会(東京工業大学大岡山キャンパス) 12a-W611-11、2019 年 3 月 12 日
2. 山内 翔、尾崎 信彦、大里 啓孝、渡辺 英一郎、池田 直樹、杉本 喜正、古城 健司、宮地 邦男、及川 陽一、David Childs、Richard Hogg「InAs 量子ドットベース波長掃引光源を用いた Swept Source-OCT の構築および OCT 画像深達度拡大の検証」第 65 回応用物理学会春季学術講演会(早稲田大学西早稲田キャンパス) 17p-P3-15、2018 年 3 月 17 日  
**第 11 回 応用物理学会 Poster Award 受賞**

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

1. 名称: 3次元量子構造の評価方法、3次元量子構造評価装置、及びコンピュータプログラム  
発明者: 尾崎 信彦、生野 大吾  
権利者: 国立大学法人和歌山大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2018-2667  
出願年: 2018 年  
国内外の別: 国内
2. 名称: 光デバイス及び光デバイスの製造方法  
発明者: 尾崎 信彦、兼平 真吾、林 佑真  
権利者: 国立大学法人和歌山大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2017-2562  
出願年: 2017 年  
国内外の別: 国内

〔その他〕

<http://web.wakayama-u.ac.jp/~ozaki/>にて研究成果を公開している。

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 池田 直樹

ローマ字氏名: IKEDA, Naoki

所属研究機関名: 物質・材料研究機構

部局名: ナノテクノロジー融合ステーションナノファブグループ

職名: 主任エンジニア

研究者番号(8桁): 10415771

研究分担者氏名: 赤坂 隆史

ローマ字氏名: AKASAKA, Takashi

所属研究機関名: 和歌山県立医科大学

部局名: 医学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 70322584

研究分担者氏名: 久保 隆史

ローマ字氏名: KUBO, Takashi

所属研究機関名: 和歌山県立医科大学

部局名: 医学部

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 30316096

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。