

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02183

研究課題名(和文) 利得特性を制御した量子ドットによる超広帯域波長掃引光源の開発とOCTへの応用

研究課題名(英文) Development of a swept-source based on quantum dots with controlled gain spectra and its application in OCT

研究代表者

尾崎 信彦 (Ozaki, Nobuhiko)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：30344873

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,360,000円

研究成果の概要(和文)：自己組織化InAs量子ドット(QD)を用いた近赤外波長掃引レーザー光源を開発し、波長掃引型光コヒーレンストモグラフィー(SS-OCT)光源へ応用した。InAs-QDは自己組織的に成長するナノ結晶の集合体であり、サイズ分布による広帯域な発光と光利得を近赤外波長帯で示す。さらに、成長条件によって光学特性を制御できるため、OCTに有用な生体透過性の高い波長帯(1-1.1 $\mu$ m帯)において最大の光利得が得られるよう調整可能である。これらの特長を活かして作製したQDベースの波長掃引型OCT光源を、独自に構築したSS-OCTに導入して画像取得を行い、その性能の定量評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、利得特性を制御したInAs量子ドットによる波長掃引光源の実現および波長掃引型OCTへの応用の可能性が示された。この結果は、OCTに有用な波長帯での新たな波長掃引光源の提供につながる意義ある成果といえる。特に、既存光源では実現しにくい波長帯での高利得媒体を半導体材料によって提供できるため、光源の小型・軽量化といったメリットにつながり、OCTの新たな応用展開も期待される。

研究成果の概要(英文)：A near-infrared swept-source (SS) was developed using self-assembled InAs quantum dots (QDs) and applied in SS optical coherence tomography (SS-OCT). InAs-QDs in an ensemble configuration offer broadband light emission and optical gain owing to their inherent size distribution within the near-infrared wavelength band, making them highly suitable for OCT light sources. Furthermore, the emission center wavelength of QDs can be controlled by varying the growth conditions. Thus, the optical gain peak can be controlled within the 1-1.1  $\mu$ m band, which is useful for obtaining a large imaging depth of OCT. We fabricated the QD-based SS with controlled gain spectra and employed it in SS-OCT. Through obtained OCT images, we quantitatively evaluated its potential as an SS-OCT light source.

研究分野：結晶工学、半導体ナノ材料、光学応用

キーワード：量子ドット 近赤外光源 光コヒーレンストモグラフィー

## 1. 研究開始当初の背景

近赤外光を用いた非侵襲な医療用断層イメージング技術として、光コヒーレンストモグラフィ(Optical Coherence Tomography: OCT)が知られている。OCTは、1991年のHuangらによるTime-domain(TD)方式での動作報告[1]以降、眼科臨床を中心に応用が進み、その後様々な医療分野への展開が進められている[2]。

OCTは、図1に示すように広帯域光干渉を利用して、対象サンプルの断層像を非侵襲に得る技術である。様々な波長光を含む広帯域光源からの光を二分岐して、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反射強度分布を測定する。さらに、光軸を面内走査し、反射強度分布を輝度として表示することで、2次元や3次元のOCT画像が得られる。OCT画像の光軸分解能は、反射強度分布における点拡がり関数(PSF)の半値幅( $\Delta z$ )であり、光源の帯域に反比例する。また、医療用途で観察対象となる生体内では、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(1-1.1  $\mu\text{m}$ )において高い浸透長が得られるため、OCT光源には近赤外波長の広帯域光源が適している。

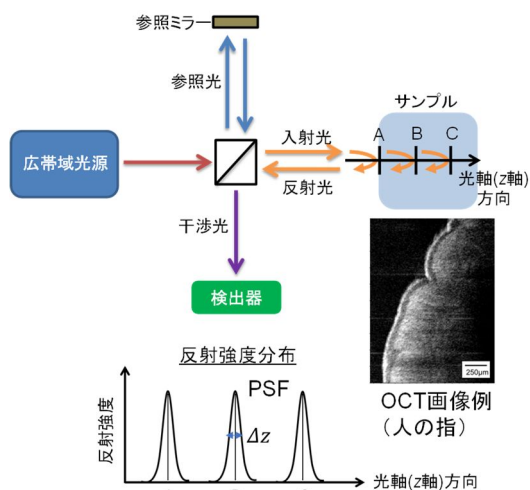


図1 OCT 模式図

これまで様々な OCT 画像取得方式が開発されており、第一世代である Huang らによる TD-OCT[1]では、参照ミラーを移動させて光軸上のサンプル内の反射強度分布を取得していたが、2000年代に開発された Fourier-domain (FD)-OCT は、参照ミラーを機械的に動かす必要がなく、高速な画像取得が可能となった。FD-OCT はさらに、干渉スペクトルを取得する Spectral-domain(SD)-OCT[3]と波長掃引光源(Swept-Source: SS)を用いる SS-OCT[4]の2つに分類され、先に第二世代として開発された SD-OCT は、光源に広帯域光源を、信号検出に分光器をそれぞれ用いる。干渉光スペクトルを周波数領域で取得し、得られた信号を逆フーリエ変換することで光軸上の反射光強度分布を取得する。SD-OCT は TD-OCT の数十倍程度高速に画像作成することから、急速に実用化された。しかしながら、SD-OCT は分光検出器の波長分解能の制限によって、画像深さに対する検出感度の低下(Sensitivity roll-off)が大きく、サンプル内部の画像範囲が狭いという課題があった。そこで、画像深さのさらなる向上を目指し、開発されたのが第三世代の SS-OCT である。SS-OCT も SD-OCT 同様、得られた干渉強度を逆フーリエ変換して空間情報を取得するが、多波長光の干渉を分光検出する SD-OCT とは異なり、光源波長を時間的に変化(掃引)させ、時間領域での干渉強度変調を検出する。特に、波長掃引レーザー光源を用いることで、SD-OCT よりも数倍以上大きな画像深さを達成できる。しかしながら、SS-OCT は光軸分解能を得にくいという課題があり、これは広帯域な SS を実現する光学利得材料候補が少ないことが主な要因となっている。そこで、OCT に有用な波長帯となる 1-1.1  $\mu\text{m}$  帯に広帯域な利得をもつ光源材料、特に小型・軽量化が可能な半導体材料が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究は、先述の要求に応えるべく、半導体ナノ材料である自己組織化 InAs 量子ドット(QD)を光学利得材料とした波長掃引レーザー光源の開発を目指した。自己組織化 InAs-QD は、GaAs 基板上に InAs をエピタキシャル成長する際に、両者の格子定数差による格子歪によって自己形成される 3次元の島状結晶の集合体である。QD の発光波長は近赤外波長帯であり、その集合体には一定のサイズ分布が存在するため、量子サイズ効果によって発光および利得スペクトルの帯域は広帯域になりやすい。さらに、QD の発光中心波長は、成長条件によって制御できる[5]ため、OCT に有用な波長帯となる 1-1.1  $\mu\text{m}$  帯において、最大の利得特性が得られるよう調整が可能である。これらの特長を活かし、OCT の課題解決につながる QD ベースの波長掃引レーザー光源開発および SS-OCT への導入を行った。

## 3. 研究の方法

### (1) 発光波長制御 QD 成長と利得デバイス作製

分子線エピタキシー法により、GaAs 基板上にサンプルを作製した。図2(a)にサンプルの模式図を示す。自己組織化 InAs-QD は、成長条件により発光中心波長の制御が可能であり、その特性を活かし、特に生体透過性の高い波長帯(1-1.1  $\mu\text{m}$ )で利得特性が最大となるように成長条件を調整した[6]。発光中心波長を制御した QD を 4 層積層した GaAs 層をコア層とし、AlGaAs クラッド層で挟んだダイオード構造を作製した。

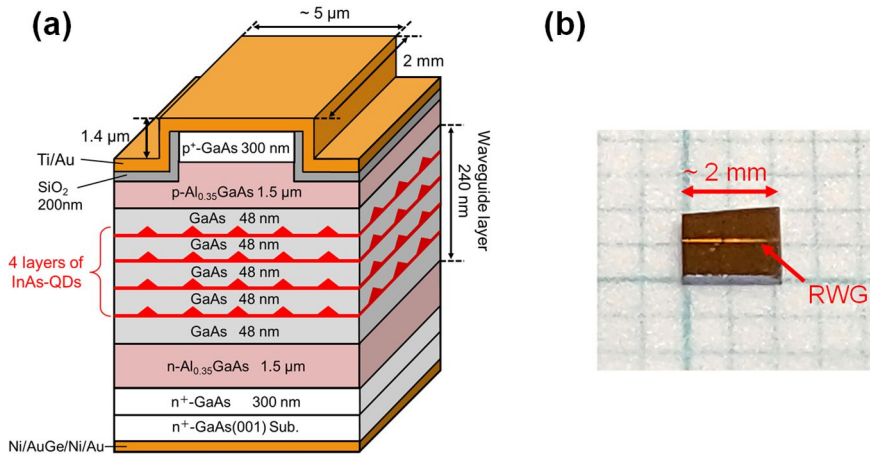


図2 作製した InAs-QD 含有利得チップの模式図(a)および概観写真(b)

成長した QD 含有基板に対し、半導体微細加工によりリッジ導波路(RWG)を形成後、電極を蒸着し、劈開によってチップ形状の端面発光型 QD 利得デバイスとした(図2(b))。このデバイスからの発光(EL)スペクトルをデバイス温度 25 °C にて高分解測定し、Hakki-Paoli(H-P)法[7]による利得スペクトルの解析を行って、利得特性を評価した。H-P 法を適用するため RWG は直線構造とし、両端面間での Fabry-Perot(F-P)共振を誘起させた。

## (2) QD 光源を導入した SS-/SD-OCT システムの構築

作製した QD 利得デバイスに対し、外部共振器(external cavity: EC)を導入して波長掃引レーザー(QD-SS)を構成した(図3点線枠内)。片側の QD 利得デバイス端面から出射される光を回折格子に導き、特定波長光を帰還させることで、レーザー発振を得ることができる。また、回折格子への入射角度を変化させ、帰還光波長を変えることで発振波長を掃引可能となる。この QD-SS を光源とし、光ファイバーベースでの干渉計を構築し、図3に示すような OCT システムを立ち上げた。サンプルと参照ミラーからの反射光を干渉させ、波長掃引に伴う時間領域の干渉強度変化を計測し、逆フーリエ変換することで空間情報に直し、光軸上の反射強度分布を取得した。また、ガルバノミラーを使用して光軸を面内走査し、2次元の OCT 画像取得を行った。

さらに、SD-OCT との性能比較を行うため、同じ QD 利得デバイスに対して、ECの有無で QD-SS と広帯域光源(QD-SLD)を切り替え、それぞれの検出系もフォトディテクタから分光器に切り替えることで SS-/SD-OCT が切り替わるハイブリッドシステムとした。サンプルミラーを光軸(深さ)方向に動かしながら、光軸上で得られる PSF と、光軸を面内走査することによって得られる OCT 画像を SS-/SD-OCT 両方式で取得した。

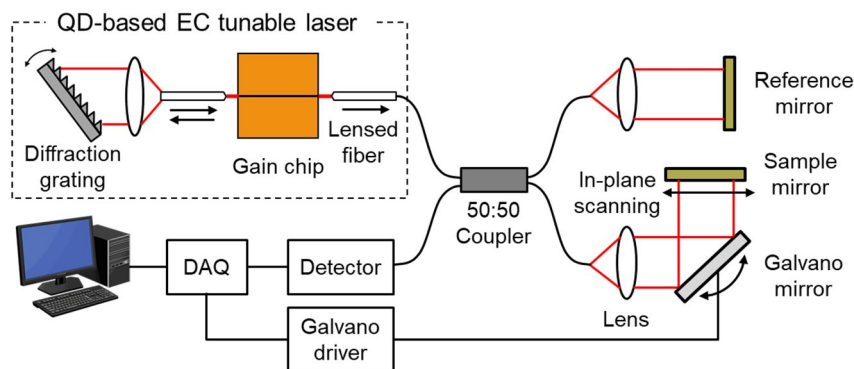


図3 立ち上げた SS-/SD-OCT システムの構成概略図

## 4. 研究成果

### (1) QD 利得デバイス特性

図4に、作製した QD 利得デバイスからの高分解能 EL スペクトル測定結果と、H-P 法によって求められた注入電流に対する利得スペクトルの例を示す。注入電流増加に伴い利得が増加し、注入電流値 60 mA では、光学利得が得られる波長帯は約 1.12–1.18 μm で、利得帯域が約 62 nm まで増加した。これらの結果から、作製した QD 利得デバイスから波長 1.1 μm 帯の光学利得が確認され、研究目的である OCT 光源として有用な波長帯をもつ SS への応用が期待できる。



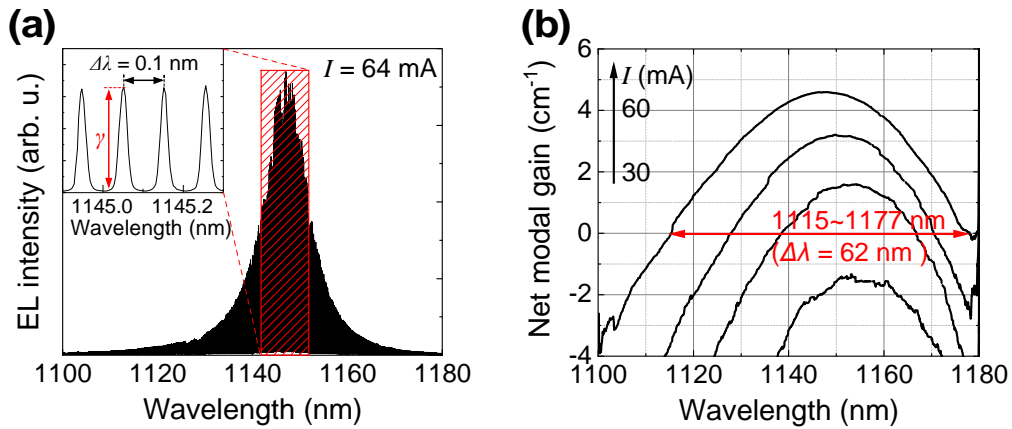


図4 QD 利得デバイスからの高分解能 EL スペクトル(a)と注入電流に対する利得スペクトル(b)の例

### (2) QD-SS 特性

次に、QD 利得デバイスに EC を導入し、波長掃引レーザー発振を試みた。図 5 に、デバイス温度を 25 °C に制御し、注入電流量を変えて得られた波長掃引レーザーのスペクトルを示す。注入電流増大に伴い、強度および波長掃引幅(ピーク強度から -6 dB までの範囲と定義)がそれぞれ増大し、 $I = 64$  mA で約 17 nm の波長掃引幅が得られた。これは、注入電流の増加による利得帯域の増加を反映した結果と考えられる。掃引幅は、H-P 法で求められた利得帯域よりも狭い範囲に留まったが、この理由として、EC における光結合効率や回折格子による光帰還の効率が挙げられる。これらを改善できれば、より広帯域の波長掃引が可能になると考えられる。また、今回用いた利得デバイスの導波路形状が直線形状であるため、内部レーザー発振の閾値電流が低く、波長掃引時の電流値が比較的低くならざるを得なかったことも、掃引幅低減の一因と考えられる。

### (3) SS-OCT 導入

得られた QD-SS を構築した SS-OCT システムに導入し、光軸方向にサンプルミラーを移動させながら各ミラー位置での PSF を取得した。参照ミラーとの光路差( $d$ )を 0.2 mm から 1.0 mm まで 0.2 mm ずつ変えて得た干渉波形を図 6 (a) に示す。光路差  $d$  が増大するとともに、干渉波形の変調周期が短くなっており、両反射光の光路差増大に伴うビート周波数の増大を反映した結果が得られた。図 6 (a) の各干渉波形に対して得られた PSF を図 6 (b) に示す。ミラー位置の移動に対応して PSF のピーク位置も移動しており、QD-SS を用いた SS-OCT で反射面の位置を反映した PSF 取得が確認された。

また、光軸を面内方向に走査し、2次元の OCT 画像取得にも成功した。図 7 左に、SS-OCT によって得られた光軸上の深さに対する PSF と OCT 画像の変化を示す。サンプルミラー位置が深くなるにつれて PSF のピーク強度が減衰(sensitivity roll-off)しており、これは取得した OCT 画像にも表れている。同じ QD 利得デバイスに対し、EC を外し、QD-SLD 光源として SD-OCT 方式で PSF と OCT 画像を取得した結果を図 7 右に示す。両方式を比べると SS-OCT の方が、ピーク強度減衰が緩やかになっており、PSF ピーク強度が -6 dB 減衰するまでの距離を画像深さと定義すると、SS-OCT では SD-OCT の約 3.3 倍の画像深さが得られた。これらの結果から、QD-SS による OCT の画像深さの拡大が確認できた。

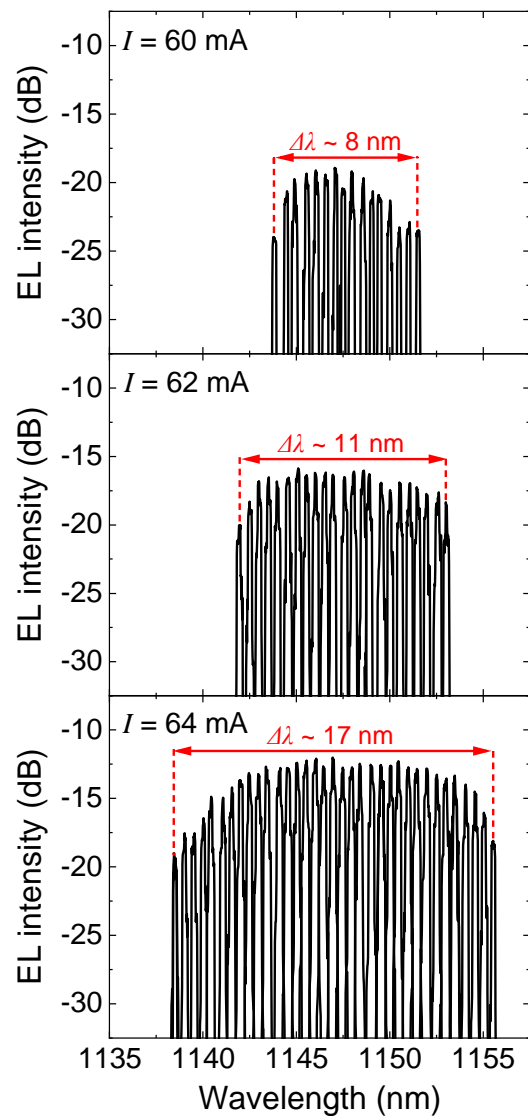


図5 各注入電流における波長掃引スペクトル

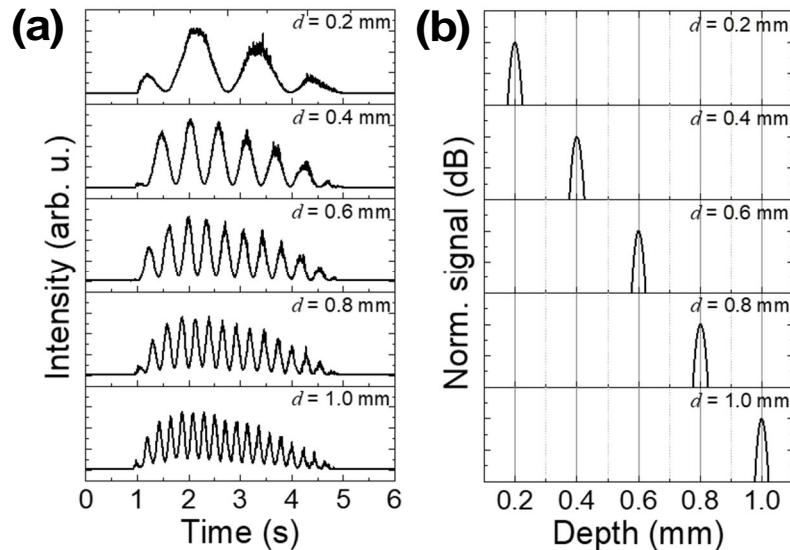


図6 サンプルミラー各位置における干渉波形(a)と PSF(b)

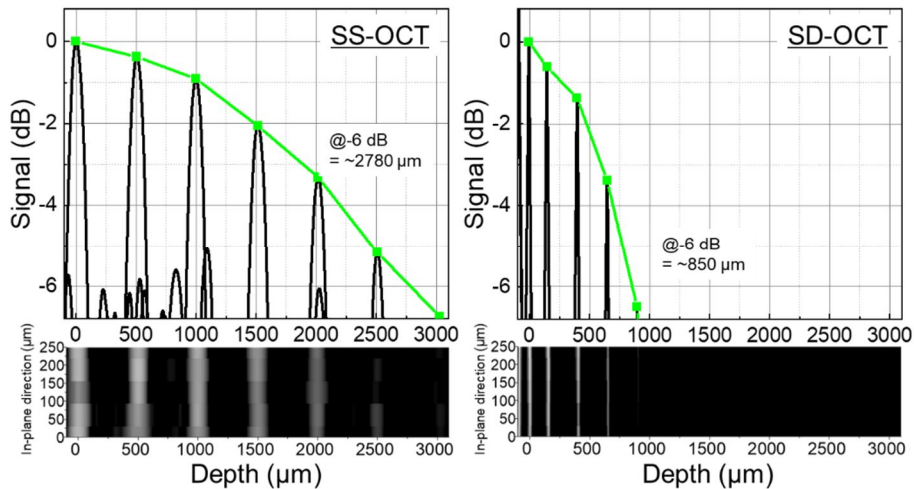


図7 SS-/SD-OCT システムにより得られた PSF と OCT 画像の両方式での比較

以上の研究成果から、利得特性を制御された InAs-QD による波長掃引レーザー光源の開発と、SS-OCT への応用に成功した。独自の OCT システムにより、SS-OCT における画像深さの SD-OCT との定量比較を行い、期待された画像深さの向上が確認された。一方、利得スペクトルから想定された QD の広帯域な光学利得範囲全体に渡るレーザー掃引が実現できておらず、この点については、外部共振器における結合効率や回折効率など、光学系の改善によって今後さらに広帯域化が実現できると考えられる。また、利得デバイス端面の無反射処理などで内部発振を抑制し、より大きな注入電流を与えることで、さらに広帯域な波長掃引も可能であり、これらの改善を重ねていくことで、光軸分解能の更なる高分解能化も見込まれる。今回の成果を基に、今後、QD を用いた OCT 光源の実用化が期待される。

< 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] M. Wojtkowski, R. Leitgeb, A. Kowalczyk, T. Bajraszewski, and A. F. Fercher, *J. Biomed. Opt.* **7** 457 (2002).
- [4] S. H. Yun, G. J. Tearney, J. F. de Boer, N. Iftimia, and B. E. Bouma: *Opt. Express* **11** 2953 (2003).
- [5] N. Ozaki, K. Takeuchi, Y. Hino, Y. Nakatani, T. Yasuda, S. Ohkouchi, E. Watanabe, H. Ohsato, N. Ikeda, Y. Sugimoto, E. Clarke, and R. A. Hogg, *Nanomater. Nanotechnol.* **4**, 26 (2014).
- [6] T. Tsuji, N. Ozaki, S. Yamauchi, K. Onoue, E. Watanabe, H. Ohsato, N. Ikeda, Y. Sugimoto, D. T. D. Childs, and R. A. Hogg, *Jpn. J. Appl. Phys.* **60**, SBBE02 (2021).
- [7] B. W. Hakki and T. L. Paoli, *J. Appl. Phys.* **46**, 1299 (1975).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Oshima Jin, Ozaki Nobuhiko, Oda Hisaya, Watanabe Eiichiro, Ohsato Hirotaka, Ikeda Naoki, Sugimoto Yoshimasa, Hogg Richard A.	4. 巻 61
2. 論文標題 Near-infrared dual-wavelength surface-emitting light source using InAs quantum dots resonant with vertical cavity modes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SD1003-1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac5b24	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 該当する

1. 著者名 Ozaki Nobuhiko, Ikuno Daigo	4. 巻 588
2. 論文標題 In-situ estimation of emission wavelength of embedded InAs QDs using RHEED intensity measurements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 126657-1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcrysgro.2022.126657	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 Tsuji Toshiya, Ozaki Nobuhiko, Yamauchi Sho, Onoue Katsuya, Watanabe Eiichiro, Ohsato Hirotaka, Ikeda Naoki, Sugimoto Yoshimasa, Childs David T. D., Hogg Richard A.	4. 巻 60
2. 論文標題 1.1 $\mu\text{m}$ waveband tunable laser using emission-wavelength-controlled InAs quantum dots for swept-source optical coherence tomography applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SBBE02~SBBE02
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abe5bc	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 該当する

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 3件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Nobuhiko Ozaki
2. 発表標題 Near-infrared broadband light sources developed using self-assembled InAs quantum dots for OCT applications
3. 学会等名 Joint Symposia on Optics, Optics & Photonics Japan 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎 信彦
2. 発表標題 発光波長制御された自己組織化InAs量子ドットによる近赤外広帯域光源開発とOCTへの応用
3. 学会等名 日本結晶成長学会第51回結晶成長国内会議（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎 信彦
2. 発表標題 半導体量子ドットの発光と生物・医療分野への応用～サイズによる発光波長制御がもたらす可能性～
3. 学会等名 生物発光化学発光研究会第37回学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥野 光基、祝出 航佑、尾崎 信彦
2. 発表標題 二層積層InAs量子ドットへのキャッピングレート制御による発光長波長化
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 祝出 航佑、奥野 光基、尾崎 信彦
2. 発表標題 1 $\mu$ m帯広帯域高強度発光InGaAs薄膜の成長条件の検討(II)
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 奥野 光基、岡田 直樹、尾崎 信彦
2. 発表標題 Dot-in-a-Well構造におけるInAs量子ドットの構造および発光特性変化のメカニズム
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2022年度75周年記念講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 J. Oshima, N. Ozaki, H. Oda, E. Watanabe, H. Ohsato, N. Ikeda, Y. Sugimoto, and R. Hogg
2. 発表標題 Near-infrared dual-wavelength surface-emitting light source using a vertical cavity resonating with discrete emission wavelengths of InAs quantum dots
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Wang, J. Oshima, H. Ohsato, E. Watanabe, N. Ikeda, Y. Sugimoto, and N. Ozaki
2. 発表標題 Broadband Emission from Stacked InAs Quantum Dots Embedded with GaAs Layers Under Various Growth Rates for Broadband Light Source Applications
3. 学会等名 21st Int. Conf. Molecular Beam Epitaxy (21st ICMBE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Okada, D. Ikuno, T. Wang, J. Oshima, and N. Ozaki
2. 発表標題 Influence of In Segregation on InAs Quantum Dots Growth in Dot-in-a-Well
3. 学会等名 21st Int. Conf. Molecular Beam Epitaxy (21st ICMBE) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 大島 仁、尾崎 信彦、小田 久哉、渡辺 英一郎、大里 啓孝、池田 直樹、杉本 喜正、R. Hogg
2. 発表標題 InAs量子ドットを利用した近赤外多波長面発光レーザの検討
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 祝出 航佑、尾崎 信彦
2. 発表標題 1ミクロン帯広帯域発光 InGaAs薄膜の作製と評価
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2021年度第2回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾崎 信彦
2. 発表標題 新規半導体ナノ材料によるOCT用近赤外広帯域光源
3. 学会等名 MOBIO産学連携オフィス テーマ別大学・高専合同シーズ発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 祝出 航佑、尾崎 信彦
2. 発表標題 1 $\mu$ m帯広帯域高強度発光 InGaAs薄膜の成長条件の検討
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 Toshiya Tsuji, Nobuhiko Ozaki, Sho Yamauchi, Katsuya Onoue, Eiichiro Watanabe, Hiroataka Ohsato, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, David T. D. Childs, and Richard A. Hogg
2. 発表標題 Tunable Laser with Emission-Wavelength-Controlled InAs Quantum dots for 1.1-um Waveband Swept-Source Optical Coherence Tomography Applications
3. 学会等名 The 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻 敏弥、尾崎 信彦、渡辺 英一郎、大里 啓孝、池田 直樹、杉本 喜正、David T. D. Childs、Richard A. Hogg
2. 発表標題 1.1um帯InAs量子ドット波長掃引レーザを用いたSS-OCTの構築と評価
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王 涛、大島 仁、祝出 航佑、尾崎 信彦
2. 発表標題 GaAsキャッピング層の成長レートによるInAs量子ドットの発光波長制御及び広帯域光源への応用
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2020年度第1回+第2回合同講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大島 仁、王 涛、尾崎 信彦
2. 発表標題 InAs量子ドットを用いた近赤外広帯域面発光レーザの検討
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2020年度第1回+第2回合同講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王 涛、大島 仁、尾崎 信彦、池田 直樹、杉本 喜正
2. 発表標題 GaAsキャッピング層の成長レートによる埋め込まれたInAs-QDのサイズおよび発光波長制御
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

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 多波長光源及び多波長光源システム	発明者 尾崎信彦、大島 仁	権利者 和歌山大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-136639	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	池田 直樹  (Ikeda Naoki)  (10415771)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・技術開発・共用部門・主任エンジニア   (82108)	
研究分担者	渡辺 英一郎  (Watanabe Eiichiro)  (10469786)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・技術開発・共用部門・エンジニア   (82108)	
研究分担者	久保 隆史  (Kubo Takashi)  (30316096)	和歌山県立医科大学・医学部・博士研究員   (24701)	
研究分担者	赤阪 隆史  (Akasaka Takashi)  (70322584)	和歌山県立医科大学・医学部・特別研究員   (24701)	

6. 研究組織（つづき）

	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	ホッグ リチャード  (Hogg Richard)	グラスゴー大学・工学部・教授	
研究協力者	チャイルズ デイビッド  (Childs David)	グラスゴー大学・工学部・講師	

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			
英国	グラスゴー大学			