

令和 2 年 9 月 15 日現在

機関番号： 14701
研究種目： 国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
研究期間： 2017～2019
課題番号： 16KK0130
研究課題名（和文）量子ドットベース波長掃引光源を導入したSS-OCTシステムの構築（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Construction of SS-OCT system introduced with quantum-dot-based swept light source(Fostering Joint International Research)

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） 5,300,000円
渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：生体内部の断層画像を非侵襲に取得可能な光コヒーレンストモグラフィー(OCT)を、より高分解能かつ高深達度のイメージング技術に発展させるべく、英国Glasgow大学、Sheffield大学との共同研究を行った。半導体ナノ材料である自己組織化InAs量子ドット(QD)を用いた近赤外の広帯域波長掃引レーザー光源(QD-SS)の開発を行い、QDが有する一定のサイズ分布に由来した広帯域な利得特性を活かした波長可変レーザー発振を得た。また、動作温度および注入電流値に対する波長掃引特性変化を系統的に調べた。これらの成果により、QD-SSを用いた高分解能かつ高深達度OCTの実現性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、我々が基課題にて開発した自己組織化InAs量子ドット(QD)ベースの波長掃引光源(QD-SS)の特性が示され、光コヒーレンストモグラフィー(OCT)光源応用の実用性が明確になった。この研究成果から、今後QD-SSのOCT応用が加速し、従来のOCTを超えた性能を有する医療診断ツール開発や、半導体ベースの特長を活かした小型・軽量のOCT開発などの新たな展開に繋がっていくことが期待される。

研究成果の概要（英文）：We conducted an international collaborative study with the UK research groups at the University of Glasgow and University of Sheffield to develop a tunable laser using self-assembled InAs quantum dots (QDs). Self-assembled InAs QDs possess an inherent size distribution that results in the near-infrared (NIR) broadband gain spectrum, thereby facilitating NIR broadband tunable laser applications for swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) light sources. We characterized the dependence of the resultant InAs QD-based tunable laser on the operation temperature and injection current, and demonstrated its feasibility for SS-OCT light source applications.

研究分野： 半導体結晶工学

キーワード： 量子ドット

1. 研究開始当初の背景

医療用イメージング技術である光コヒーレンストモグラフィー(OCT)[1]は、近赤外光をプローブとする非侵襲な断層イメージング技術であり、光を用いるため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、眼科臨床を始め様々な医療分野へ拡がりつつある。しかしながら、現状の OCT 画像の分解能は 10–15 μm 、画像深さ(深達度)は 1–2 mm 程度であり、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、光源に様々な波長の光を含む広帯域(低コヒーレンス)な光を用いる点の特徴であり、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、その干渉信号を取得、解析することでサンプル内の光軸上の反射率分布を測定する。これまでに幾つかの方式が開発されているが、図 1 に示すような、光源波長を順次掃引しながら干渉強度の時間変化を計測し、そのフーリエ変換によってサンプル内部の反射率分布の情報を得る波長掃引型(SS-)OCT が最近の主流になりつつある。

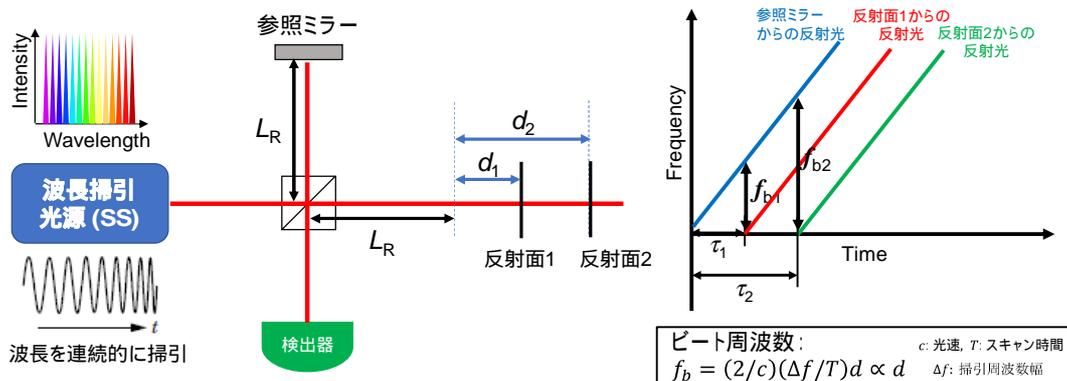


図 1 SS-OCT 動作原理の模式図

SS-OCT は、光源として波長掃引型のレーザを用いることが多く、コヒーレンス長が長いことから深達度が得やすいという特長がある。一方で、波長掃引幅を拡大することが困難であるため、光源帯域に反比例する光軸分解能が得にくいという課題があった(現状の分解能は 10–20 μm 程度)。我々はその課題に対する一つの解決策として、半導体ナノ材料である自己組織化量子ドット(QD)[3]を用いた広帯域な波長掃引レーザ光源開発を目指してきた[4]。

2. 研究の目的

本研究は、上記の QD を用いた新規光源開発を行った科研費基盤研究(B)「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」(課題番号 16H03858)を基課題とする国際共同研究である。基課題で開発した自己組織化 InAs-QD ベースの広帯域波長掃引レーザ光源(SS: Swept-Source)を SS-OCT システムへ展開するために必要な知見を得るべく、当該技術に関して先行的に研究を行っている英国シェフィールド大学およびグラスゴー大学のグループに滞在し、様々な実験検証を行った。

3. 研究の方法

先述の通り、SS-OCT における波長掃引レーザ光源の波長掃引幅の拡大に資する新規光源として、通常材料よりも利得幅の広帯域化が期待できる自己組織化 InAs-QD の利用を検討した。InAs-QD ベースの光学利得チップは、100 nm 以上の広帯域な利得特性を示しており[5]、この帯域幅を活用すれば従来の波長可変レーザ光源を上回る波長掃引幅が期待できる。開発にあたり、OCT システムおよび QD 光源に精通している英国シェフィールド大学 Stephen Matcher 教授およびグラスゴー大学の Richard Hogg 教授らのグループと国際共同研究を行った。従来光源と発光材料を異にする QD 波長可変レーザに関して、彼らの経験とノウハウは世界的に見てもトップクラスであり、彼らから多くの技術を学び、OCT への展開を目指した。

基課題にて我々が作製した QD ベースの利得チップを用いて、共同研究先にて回折格子による外部共振器でのレーザ発振、及び発振波長の掃引実験を行った。図 2 はその模式図および実際に実験を行ったセットアップの写真を示している。利得チップには J 字型のリッジ型導波路(RWG)を形成し、片側端面に約 7 度の傾斜で入射させた[4]。これにより、片側端面での反射率を低下させ、チップ内部での Fabry-Perot(FP)共振によるレーザ発振を抑制した。RWG の傾斜側からの出射光を回折格子に導き、特定波長光のみを利得チップに帰還させ、当該波長でのレーザ発振を誘導した。また、回折格子の角度を変えて発振波長の掃引を行った。

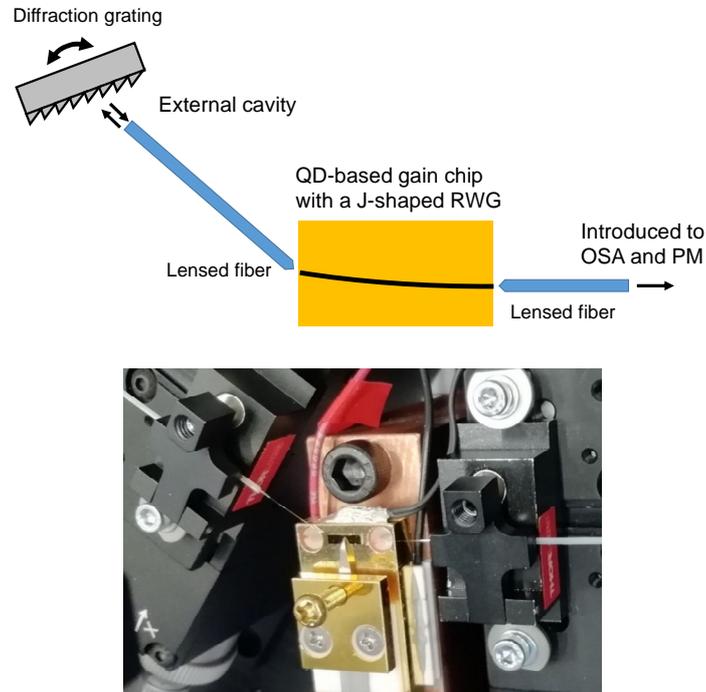


図2 InAs-QD ベース利得チップの波長掃引特性計測に用いた
セットアップの模式図（上）および写真（下）

QD ベース利得チップは熱電コントローラ(TEC)付きのサンプルステージ上に設置し、様々な動作温度（15–25 °C）に制御しながら、光出力–注入電流($L-I$)特性を計測した。電流注入にはパルス電源を用いた。また、光スペクトルアナライザによる発振スペクトルの計測を行い、回折格子による光帰還波長に対応した発振波長および波長掃引特性を確認した。

4 . 研究成果

図3は、注入電流 400 mA で外部共振器の回折格子角度を変化させて得られた発振スペクトルを、各 TEC 温度ごとに纏めた例である。外部共振器による QD ベース利得チップからのレーザ発振及び波長掃引が確認され、発振帯域が動作温度に対して変化する様子が見られた。具体的には、動作温度の低下とともに掃引可能な波長帯域は 32 nm から 51 nm へ拡大した。また、掃引範囲の中心波長は約 1110 nm でほぼ一定であった。この波長掃引特性の変化は、動作温度の変化による QD 利得チップの利得特性の変化によるものと考えられる。

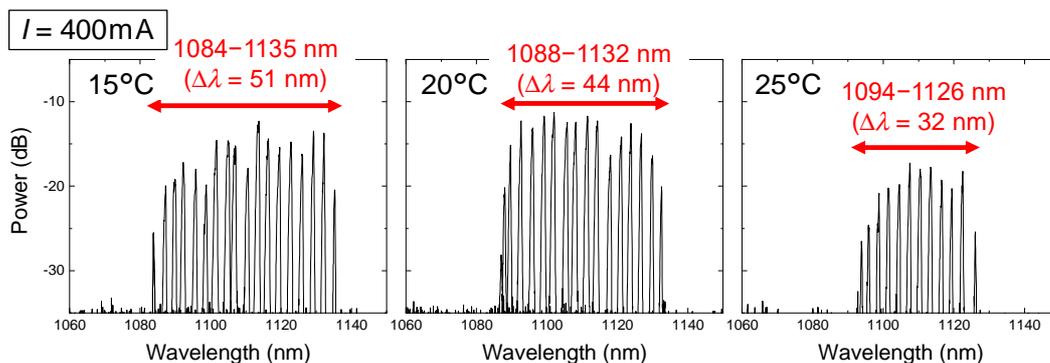


図3 外部共振器による波長掃引スペクトルおよび温度依存性評価の例

同様の測定を、注入電流を変えて行い、発振特性の温度および注入電流に対する依存性を系統的に調べた。図4にその結果を示す。図中の矢印の範囲が、波長掃引帯域を表している。温度および注入電流値に対する掃引幅の変化がシステマティックに変化する様子が見られた。これは、先述の QD 利得チップにおける利得特性の変化を表しており、動作温度および注入電流値の変化に対し、波長掃引光源としての特性が変化することが示された。すなわち、SS-OCT 光源として使用する際の、QD 利得チップに対する適正な動作温度および注入電流値を設定する必要があることを意味している。

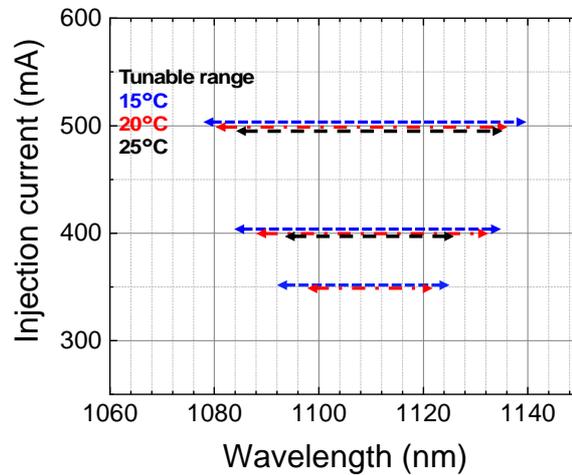


図4 各温度（15–25°C）での注入電流に対する波長掃引範囲の変化

今回の利得特性評価の条件下では、動作温度 15 °C、注入電流値 500 nm にて波長掃引帯域は約 61 nm 程度であったが、その場合でも従来光源による SS-OCT の光軸分解能を上回る約 8.7 μm の光軸分解能が見込まれ、高分解能かつ高深達度の SS-OCT を実現する光源としての応用が十分に期待できる結果となった。注入電流値をさらに増加させた実験も行ったが、600 mA 以上ではチップ内部の FP 発振が起き始め、モード不安定性が発生したため、実用的な注入電流範囲内の結果のみを示している。このチップ内部での FP 発振を抑制するためには、RWG の傾斜端面側を無反射コートするなどの対策を施すことが有効と考えられ、その対策によってさらに注入電流値を増加させて波長掃引帯域を拡大できると考えられる。また、QD の材料自体がもつ材料利得特性を QD 成長条件などにより最適化することで、さらに広帯域な波長掃引特性を持たせることも可能と考えられる。

<まとめ>

従来の発光材料に対し、より広帯域な利得特性が期待される自己組織化 InAs-QD を用いた利得チップからのレーザ発振および波長掃引特性を系統的に調べ、SS-OCT 用光源としての可能性を検討した。回折格子を用いた外部共振器により、レーザ発振および波長可変性が確認され、その波長掃引特性が、動作温度および注入電流値に依存することを明らかにした。この特性変化は、QD 利得チップのもつ利得特性の温度およびキャリア濃度依存性によるものと考えられ、今後、SS-OCT 光源として利用する際に動作温度および注入電流値の制御の重要性を示す結果となった。現状での波長掃引特性から見込まれる SS-OCT 光源としての性能(光軸分解能)は、現在の市販 SS-OCT を超える値が出ているが、今後さらに、チップ端面の無反射コーティングによりチップ内部の FP 発振を抑制して注入可能な電流値を増加させたり、利得チップ内の QD の成長条件の最適化により材料利得特性を制御するなどの対策を施すことで、より性能向上が可能になると考えられる。以上から、QD ベース利得チップによる SS-OCT 光源応用の可能性および有用性が示された。

<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] *Self-Assembled Quantum Dots, Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology Series Vol. 1*, Z. M. Wang ed. (Springer, 2008).
- [4] 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] 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).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2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 Nobuhiko Ozaki	4. 巻 58
2. 論文標題 Noninvasive High-axial-resolution Profile Imaging Using Near Infrared Broadband Light Source Based on Self-assembled Quantum Dots (Invited Review)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Imaging Soc. Jap.	6. 最初と最後の頁 617-625
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11370/isj.58.617	査読の有無 無
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 尾崎 信彦	4. 巻 47
2. 論文標題 自己組織化量子ドットを用いた広帯域スーパーluminescentダイオードの開発と光コヒーレンストモグラフィへの応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 578-582
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Ozaki Nobuhiko, Yamauchi Sho, Hayashi Yuma, Watanabe Eiichiro, Ohsato Hiroataka, Ikeda Naoki, Sugimoto Yoshimasa, Furuki Kenji, Oikawa Yoichi, Miyaji Kunio, Childs David T D, Hogg Richard A	4. 巻 52
2. 論文標題 Development of a broadband superluminescent diode based on self-assembled InAs quantum dots and demonstration of high-axial-resolution optical coherence tomography imaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 225105 ~ 225105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab0ea5	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, Childs David T. D., Boldin Aleksandr, Ikuno Daigo, Onoue Katsuya, Ohsato Hiroataka, Watanabe Eiichiro, Ikeda Naoki, Sugimoto Yoshimasa, Hogg Richard A.	4. 巻 10939
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1093911 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2509984	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16件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Nobuhiko Ozaki, David Childs, Aleksandr Boldin, Hirotaka Ohsato, Eiichiro Watanabe, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, and Richard Hogg
2. 発表標題 Characterization of 1.1- μ m-Centered Tunable Laser Based on InAs Quantum Dots for Swept-Source Optical Coherence Tomography Application
3. 学会等名 7th Int. Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemionNano2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daigo Ikuno, Tao Wang, Naoki Okada, and Nobuhiko Ozaki
2. 発表標題 Investigation of InAs Quantum Dot Deformation During Capping with an InGaAs Layer Using Time-resolved RHEED Measurements
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Ozaki, David Childs, Aleksandr Boldin, Daigo Ikuno, Katsuya Onoue, Hirotaka Ohsato, Eiichiro Watanabe, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, and Richard Hogg
2. 発表標題 Tunable external-cavity laser diode based on self-assembled InAs quantum dots for swept-source optical coherence tomography applications at 1100 nm
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田 直樹、生野 大吾、王 涛、大島 仁、尾崎 信彦
2. 発表標題 Dot-in-a-Well構造におけるInAs量子ドット成長に対するIn偏析の影響()
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 王 涛、岡田 直樹、大島 仁、尾崎 信彦、池田 直樹、杉本 喜正
2. 発表標題 GaAsキャップ層により埋め込まれたInAs量子ドットのキャップ層成長レートによる広帯域発光中心波長制御
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻 敏弥、尾上 克也、生野 大吾、尾崎 信彦、大里 啓孝、渡辺 英一郎、池田 直樹、杉本 喜正、D. T. D. Childs、R. A. Hogg
2. 発表標題 広帯域波長掃引光源を目指した多波長InAs量子ドット利得チップの光利得評価
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2019年度第3回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡田 直樹、生野 大吾、王 涛、尾崎 信彦
2. 発表標題 InGaAs量子井戸内に埋め込んだInAs量子ドット成長に対する成長基板上へのIn偏析の影響
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2019年度第2回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾崎 信彦、David Childs、Aleksandr Boldin、大里 啓孝、渡辺 英一郎、池田 直樹、杉本 喜正、Richard Hogg
2. 発表標題 波長掃引型光コヒーレンストモグラフィ光源応用に向けたInAs量子ドットベース1.1 μ m帯波長可変レーザーの特性評価
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 辻 敏弥、尾上 克也、生野 大吾、尾崎 信彦、大里 啓孝、渡辺 英一郎、池田 直樹、杉本 喜正、D. T. D. Childs、R. A. Hogg
2. 発表標題 波長掃引光源応用を目指した自己組織化InAs量子ドットの光利得評価
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 尾崎 信彦
2. 発表標題 自己形成量子ドットを利用した広帯域スーパーluminescenceダイオードの作製と光コヒーレンストモグラフィへの応用
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 王 涛、生野 大吾、岡田 直樹、尾崎 信彦
2. 発表標題 埋め込まれたInAs量子ドットの構造および発光波長のRHEED強度計測による評価
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2019年度第1回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 発光波長制御InAs量子ドットを用いた1.1 μ m帯外部共振器型波長可変レーザー
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾崎 信彦
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第21回光科学若手研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尾崎 信彦
2. 発表標題 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
3. 学会等名 応用物理学会関西支部平成30年度第1回講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 InAs量子ドット波長可変光源を用いたSwept Source-OCTの構築およびOCT画像深達度拡大の検証
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尾上 克也、生野 大吾、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、及川 陽一、宮地 邦男、D. T. D. Childs、R. A. Hogg
2. 発表標題 波長掃引光源用InAs量子ドットベース利得チップの作製と特性評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 波長掃引型光コヒーレンストモグラフィ装置及び波長可変レーザー光源	発明者 尾崎 信彦	権利者 国立大学法人和歌山大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-139400	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

第11回応用物理学会Poster Award受賞(2018年4月1日)

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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ホッグ リチャード (Hogg Richard)	グラスゴー大学・School of Engineering・Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	マッチャー ステファン (Matcher Stephen)	シェフィールド大学・Dept. EEE・Professor	