

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14149

研究課題名(和文)有機レーザー色素と有機・無機ペロブスカイトを融合させた有機半導体レーザーの創製

研究課題名(英文) Realization of electrically pumped organic semiconductor laser by combining organic laser dye with organic-inorganic hybrid perovskite

研究代表者

松島 敏則 (Matsushima, Toshinori)

九州大学・カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所・准教授

研究者番号：40521985

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：まず最初に、ペロブスカイトトランジスタを高性能化させることを試みた。素子構造を最適化することから非常に高いホール移動度 $26\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ を示すpチャンネルペロブスカイトトランジスタの作製に成功した。また、nチャンネル駆動させることに成功し、 $4.6\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ の電子移動度が得られた。次に、有機薄膜からのレーザー発振特性を検討した。これまでで最も高周波数の80MHzのパルス励起光でレーザー発振させることに成功した。また、これまでで最も長い130msの連続励起光でレーザー発振させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：We attempted to enhance performance of field-effect transistors with an organic-inorganic hybrid perovskite semiconductor. We obtained a very high hole mobility of up to $26\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ in p-channel perovskite transistors by optimizing transistor structures. We also demonstrated the first-ever n-channel operation of perovskite transistors with an electron mobility of up to $4.6\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ through a source-drain electrode modification. In addition, we investigated the optically pumped lasing properties of an organic semiconductor film embedded into an optical resonator. We demonstrated not only quasi-continuous-wave operation with a very high frequency of 80 MHz but also true continuous-wave operation with a very long excitation duration of 30 ms for the devices. These frequency and time are the highest ever reported in any organic laser device.

研究分野：デバイス物理

キーワード：有機無機ハイブリッドペロブスカイト レーザー色素 トランジスタ キャリア移動度 光共振器 レーザー発振 連続励起光

1. 研究開始当初の背景

有機発光ダイオード(有機 EL)の飛躍的な進歩を背景に、有機半導体レーザーの実現を目指した研究が進められている。もし仮に有機半導体レーザーが実現できれば、データ送信、ラボ・オン・チップ型の医療診断、化学分析ツールなどとして用いることができ、学術的のみならず産業応用の面からも意義深い。

有機半導体レーザーを実現するためには、(1)レーザー発振の閾値が低い有機色素の開発、(2) kA/cm^2 を超える大電流を有機薄膜に注入すること、(3)三重項励起状態やポーラロンとの相互作用により生じる一重項励起状態の失活を抑制すること、(4)金属電極、励起状態吸収、およびポーラロン吸収による発光の伝搬ロスを抑止することが必要である。つまり、有機半導体レーザーを実現するためには、現状の有機 EL と比較しても遥に優れた素子性能や耐久性が要求される。

申請者および申請者が所属するグループは、低いレーザー発振の閾値を持つ有機色素の開発(Appl. Phys. Lett. 86, 071110, 2005)、有機薄膜への大電流注入(Jpn. J. Appl. Phys. 46, L1179, 2007)、励起子失活過程や伝搬ロスの解析(Appl. Phys. Lett. 84, 1401, 2003 や J. Appl. Phys. 108, 064516, 2010) などについて継続的な研究を行ってきた。既に、究極的に低閾値の有機レーザー色素の開発に成功しており、有機半導体レーザーを実現する際の大きな問題となるのは前記の(2)-(4)である。

2. 研究の目的

本研究では、有機レーザー色素を導入したペロブスカイト薄膜と光共振器を用いてトランジスタ型のデバイスを作製することで、上記の残された問題を克服し、有機半導体レーザーを世界で初めて実現することを目指した。発光効率が高く、4準位レーザー媒体である有機分子は、良質の低閾値レーザー媒体である。有機半導体の発光波長の多様性、大面積加工性やフレキシブル性などの特徴を活かすことができれば、有機半導体レーザーが学界および産業界に与える影響は十分に大きいと考えられる。本研究では、有機半導体レーザーを目指すだけでなく、高密度の励起子が存在している状態における励起子過程などの未開拓の物理過程を解明することも狙う。

3. 研究の方法

本研究ではまず最初に、ペロブスカイト薄膜を半導体層としたトランジスタを高性能化させることから着手した。このために、 NH_3I 末端を持つ自己組織化単分子膜($\text{NH}_3\text{I-SAM}$)による基板の表面修飾、ソース・ドレイン電極構造、ゲート電極構造、電極バッファ層などを工夫しながらペロブスカイトトランジスタを作製し、トランジスタ特性を真空中で測

定した。いずれのトランジスタにおいてもメタノール溶液からのスピコートによりペロブスカイト半導体層を成膜した。

また、光共振器の作製にも取り組んだ。電子線リソグラフィやイオンエッチングなどを駆使して、シリコンウエハ上の SiO_2 にグレーティングを形成させた。光共振器の性能を確認するために、低閾値でレーザー発振を示す有機材料である BSB-Cz を真空蒸着法により光共振器上に成膜し、パルス励起光や連続励起光を照射した際のレーザー発振特性を検討した。

4. 研究成果

X線回折測定や過渡 PL 特性の結果から、 $\text{NH}_3\text{I-SAM}$ で表面修飾した基板にペロブスカイトをスピコートすると、結晶性と原料からペロブスカイトへの変換に優れ、キャリアトラップ密度が少ないペロブスカイト薄膜が得られることが分かった(Adv. Mater. 28, 10275, 2016)。この薄膜を用いてボトムコンタクト・ボトムゲート構造のトランジスタを作製したところ、 $\text{NH}_3\text{I-SAM}$ 処理を行っていないトランジスタと比較すると、ホール移動度が約 5 倍に向上することを見出した。さらに、金のトップコンタクト構造と MoO_3 バッファ層を用いると、ホール注入効率が向上するために、ホール移動度がさらに約 2.8 倍向上することを見出した。

励起光を膜面もしくは基板面から入射した際の過渡 PL 特性を測定した。膜面から入射した際に過渡 PL 曲線の傾きが緩やかになっていったことから、基板/ペロブスカイト界面近傍と比較すると、ペロブスカイト/空気界面近傍のキャリアトラップ密度が低いことが推測された。この点を活用して、CYTOP フッ素ポリマー絶縁膜と Al ゲート電極をペロブスカイトの上に成膜し、トップコンタクト・トップゲート構造のトランジスタを作製した。ボトムゲート構造と比較すると、トップゲート構造を用いるとホール移動度が約 1.7 倍に向上することを見出した。このトップコンタクト・トップゲート構造においては、ヒステリシスは全く観測されず、高いバイアス安定性が得られた。数百個に及ぶトランジスタを評価したところ、平均で $12 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、

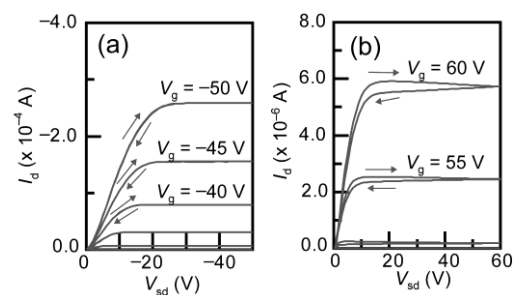


図 1. ペロブスカイトトランジスタの(a)pチャンネル特性と(b)nチャンネル特性

最大で $15 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ のホール移動度が得られた(図 1a)。

前記の p チャンネルトランジスタに加えて、 n チャンネルトランジスタの作製を試みた (Appl. Phys. Lett. 109, 253301, 2016)。しかし、これまでに用いてきた金電極とペロブスカイトの間には非常に大きな電子注入障壁があるために n チャンネル駆動させることはできなかった。電子注入障壁を減少させ、 n チャンネル駆動させるために、低仕事関数の Al, Ag, MgAg, Ca をソースドレイン電極として用いた。しかし、ペロブスカイトと低仕事関数電極の間で化学反応が生じるために、トランジスタ駆動させることができなかった。この問題を解決するために、低仕事関数電極とペロブスカイトの間に C_{60} バッファ層を挿入すると、化学反応を完全に抑制することができ、 n チャンネル駆動に成功した。 C_{60} バッファ層と Al 電極を組み合わせることで、最大で $1.5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ の電子移動度が得られた(図 1b)。熱刺激電流測定の結果から、ホールトラップ密度よりも電子トラップ密度の方が約 40 倍大きいことが分かった。このために、ホール移動度よりも電子移動度の方が低くなったと考えられる。

本研究では、ソースドレイン電極材料・構造および電極バッファ層を最適化することでキャリア注入特性を向上させた。しかし、このような手法では接触抵抗の影響を完全に排除することは困難であった。実用化を視野に入れるとソースドレイン電極間のチャンネル長は短い方が良い。しかし、本研究では、本質的なキャリア移動度を議論するために、チャンネル長を増加させた (Appl. Phys. Express 10, 024103, 2017)。図 2 に示すようにチャンネル長を増加させるほどホール移動度と電子移動度は増加することが分かった。チャンネル長が $400 \mu\text{m}$ 以上になるとホール移動度と電子移動度は一定となった。この領域では、全抵抗に対する接触抵抗の影響

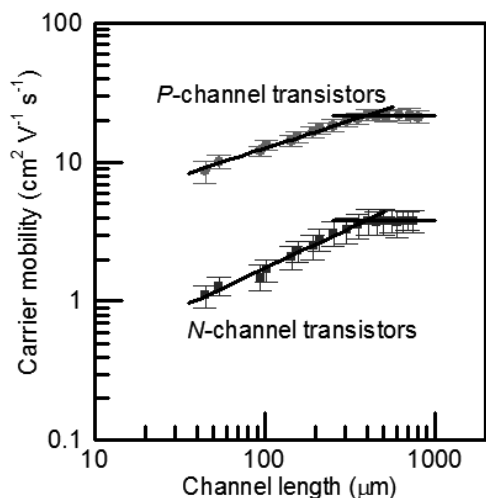


図 2. ホール移動度と電子移動度のチャンネル長依存性

響が無視できるほど小さくなったと考えられる。この領域から見積もったホール移動度は最大で $26 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、電子移動度は最大で $4.6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ であった。以前にペロブスカイトトランジスタで報告された値と比較すると、今回得られたホール移動度と電子移動度は 1 桁ほど大きい。

ペロブスカイトトランジスタの研究と並行して、光共振器の研究も推進した。有機薄膜を高強度の紫外線で連続励起すると、三重項励起状態による一重項励起状態の失活や温度上昇による有機薄膜の焼灼が生じる。そのためレーザー発振を得るためにはパルス波で光励起する必要がある。本研究では、三重項励起状態による一重項励起状態の失活が極めて生じにくい BSB-Cz レーザー材料に着目し、光共振器を組み合わせることでレーザー素子を作製した (Science Advances 3, e1602570, 2017)。さらに、有機薄膜の焼灼を抑制するために、BSB-Cz の上に CYTOP を接着層として高熱伝導率のサファイヤ基板で封止した。本技術を用いることで、これまでで最も高周波数の 80MHz のパルス励起光でレーザー発振させることに成功した。また、これまでで最も長い 30ms の連続励起光でレーザー発振させることにも成功した(図 3)。

本研究により、ペロブスカイトトランジスタの p チャンネル駆動と n チャンネル駆動に成功し、極めて高いキャリア移動度を実現した。また、高性能の光共振器を作製し、高効率なレーザー発振を観測することができた。現在、これら結果を組み合わせ、有機半導体レーザーの実現に向けて検討を行っている最中である。

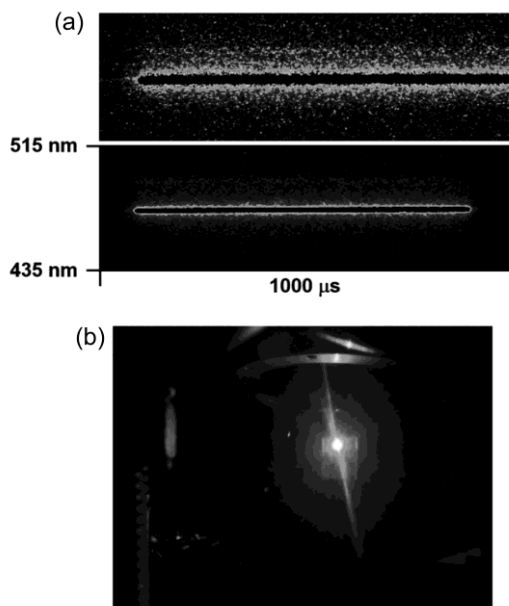


図 3. (a) 30ms の連続励起光によるレーザー発振のストリークカメラ像および(b) レーザー発振の写真

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 27 件)

- ① A. S. D. Sandanayaka, T. Matsushima, F. Bencheikh, K. Yoshida, M. Inoue, T. Fujihara, K. Goushi, J.-C. Ribierre, C. Adachi, Toward continuous-wave operation of organic semiconductor lasers, *Science Advances*, 査読有, 3, e1602570, 2017.
- ② T. Matsushima, S. Hwang, S. Terakawa, T. Fujihara, A. S. D. Sandanayaka, C. Qin, C. Adachi, Intrinsic carrier transport properties of solution-processed organic-inorganic perovskite films, *Appl. Phys. Express*, 査読有, 10, 024103, 2017.
- ③ T. Fujihara, S. Terakawa, T. Matsushima, C. Qin, M. Yahiro, C. Adachi, Fabrication of a high coverage MASnI₃ perovskite film for a stable planar heterojunction solar cell, *J. Mater. Chem. C*, 査読有, 5, 1121-1127, 2017.
- ④ D.-H. Kim, A. S. D. Sandanayaka, L. Zhao, D. Pitrat, J. C. Mulatier, T. Matsushima, C. Andraud, J. C. Ribierre, C. Adachi, Extremely low amplified spontaneous emission threshold and blue electroluminescence from a spin-coated octafluorene neat film, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, 110, 023303, 2017.
- ⑤ C. Qin, T. Matsushima, T. Fujihara, C. Adachi, Multifunctional benzoquinone additive for efficient and stable planar perovskite solar cells, *Adv. Mater.*, 査読有, 29, 1603808, 2017.
- ⑥ T. Matsushima, F. Mathevet, B. Heinrich, S. Terakawa, T. Fujihara, C. Qin, A. S. D. Sandanayaka, J.-C. Ribierre, C. Adachi, *N*-channel field-effect transistors with an organic-inorganic layered perovskite semiconductor, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, 109, 253301, 2016.
- ⑦ T. Matsushima, T. Yasuda, K. Fujita, C. Adachi, Field-effect transistors with vacuum-deposited organic-inorganic perovskite films as semiconductor channels, *J. Appl. Phys.*, 査読有, 120, 233301, 2016.
- ⑧ S. Hwang, Y. S. Yang, I. S. Park, T. Matsushima, C. Adachi, Solution-processed organic thermoelectric material exhibiting doping-concentration-dependent polarity, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 査読有, 18, 29199-29207, 2016.
- ⑨ T. Matsushima, M. Inoue, T. Fujihara, S. Terakawa, C. Qin, A. S. D. Sandanayaka, C. Adachi, High-coverage organic-inorganic perovskite film fabricated by double spin coating for improved solar power conversion and amplified spontaneous emission, *Chem. Phys. Lett.*, 査読有, 661, 131-135, 2016.
- ⑩ T. Matsushima, S. Hwang, A. S. D. Sandanayaka, C. Qin, S. Terakawa, T. Fujihara, M. Yahiro, C. Adachi, Solution-Processed Organic-Inorganic Perovskite Field-Effect Transistors with High Hole Mobilities, *Adv. Mater.* 査読有, 28, 10275-10281, 2016.
- ⑪ A. S. D. Sandanayaka, L. Zhao, D. Pitrat, T. Matsushima, C. Andraud, J.-H. Kim, J.-C. Ribierre, C. Adachi, Improvement of the quasi-continuous-wave lasing properties in organic semiconductor lasers using oxygen as triplet quencher, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, 108, 223301, 2016.
- ⑫ D. P.-K. Tsang, T. Matsushima, C. Adachi, Operational stability enhancement in organic light-emitting diodes with ultrathin Liq interlayers, *Sci. Rep.*, 査読有, 6, 22463, 2016.
- ⑬ M. Inoue, T. Matsushima, C. Adachi, Low amplified spontaneous emission threshold and suppression of electroluminescence efficiency roll-off in layers doped with ter(9,9'-spirobifluorene), *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, 108, 133302, 2016.
- ⑭ A. S. D. Sandanayaka, K. Yoshida, M. Inoue, C. Qin, K. Goushi, J.-C. Ribierre, T. Matsushima, C. Adachi, Quasi-Continuous-Wave Organic Thin-film Distributed Feedback Laser, *Adv. Opt. Mater.*, 査読有, 4, 834-839, 2016.
- ⑮ Y. Esaki, T. Matsushima, C. Adachi, Current enhancement in organic layers through gap compression by cold and hot isostatic pressing, *Adv. Funct. Mater.*, 査読有, 26, 2940-2949, 2016.
- ⑯ K. Yoshida, T. Matsushima, H. Nakanotani, C. Adachi, Quantification of temperature rise in unipolar organic conductors during short voltage-pulse excitation using electrical testing methods, *Org. Electron.*, 査読有, 31, 191-197, 2016.

⑰ M. Inoue, T. Serevičius, H. Nakanotani, K. Yoshida, T. Matsushima, S. Jursėnas, C. Adachi, Effect of reverse intersystem crossing rate to suppress efficiency roll-off in organic light-emitting diodes with thermally activated delayed fluorescence emitters, Chem. Phys. Let., 査読有, 644, 62-67, 2016.

⑱ C. Qin, T. Matsushima, T. Fujihara, C. Adachi, Degradation Mechanisms of Solution-Processed Planar Perovskite Solar Cells: Thermally Stimulated Current Measurement for Analysis of Carrier Traps, Adv. Mater., 査読有, 28, 466-471, 2016.

⑲ A. S. D. Sandanayaka, T. Matsushima, C. Adachi, Degradation mechanisms of organic light-emitting diodes based on thermally activated delayed fluorescence molecules, J. Phys. Chem. C, 査読有, 119, 23845-23851, 2015.

⑳ H. Kuwae, A. Nitta, K. Yoshida, T. Kasahara, T. Matsushima, M. Inoue, S. Shojil, J. Mizuno, C. Adachi, Suppression of external quantum efficiency roll-off of nanopatterned organic-light emitting diodes at high current densities, J. Appl. Phys., 査読有, 118, 155501, 2015.

㉑ T. Matsushima, T. Fujihara, C. Qin, Y. Esaki, S. Hwang, A. S. D. Sandanayaka, C. Adachi, Morphological control of organic-inorganic perovskite layers by hot isostatic pressing for efficient planar solar cells, J. Mater. Chem. A, 査読有, 3, 17780-17787, 2015.

㉒ T. Matsushima, A. S. D. Sandanayaka, Y. Esaki, C. Adachi, Vacuum-and-solvent-free fabrication of organic semiconductor layers for field-effect transistors, Sci. Rep. 査読有, 5, 14547, 2015.

[学会発表] (計 62 件)

① T. Matsushima, S. Hwang, A. S. D. Sandanayaka, C. Qin, S. Terakawa, T. Fujihara, M. Yahiro, C. Adachi, Organic-inorganic perovskite field-effect transistors, The 23rd International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2016, Fukuoka Convention Center (Fukuoka), Japan, December 7-9, 2016.

② T. Matsushima, S. Hwang, A. S. D. Sandanayaka, C. Qin, S. Terakawa, T. Fujihara, M. Yahiro, C. Adachi,

Organic-inorganic perovskite field-effect transistors, The 8th Asian Conference on Organic Electronics 2016 (A-COE 2016), Kyoto University (Kyoto), Japan, December 5-7, 2016.

③ T. Matsushima, Organic-Inorganic Perovskite Field-Effect Transistors with High Carrier Mobilities, Hangzhou, China, October 17, 2016.

④ A. S. D. Sandanayaka, T. Matsushima, K. Yoshida, T. Fujihara, K. Goushi, J.-C.s Ribierre, C. Adachi, Low-threshold Quasi-continuous-wave Organic Semiconductor Laser, KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics 2016 (KJF-ICOMEF 2016), Across Fukuoka (Fukuoka), Japan, September 4-7, 2016.

⑤ T. Matsushima, S. Hwang, A. S. D. Sandanayaka, C. Qin, T. Fujihara, M. Yahiro, C. Adachi, High-hole-mobility organic-inorganic perovskite field-effect transistors, SPIE Optics + Photonics 2016, San Diego, California, United States, August 28-September 1, 2016.

⑥ C. Qin, T. Matsushima, C. Adachi, Improved Long-Term Stability of Planar Perovskite Solar Cells, The International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals in 2016 (ICSM2016), Guangzhou, China, June 26-July 1, 2016

⑦ T. Matsushima, T. Fujihara, C. Qin, S. Terakawa, Y. Esaki, S. Hwang, A. S. D. Sandanayaka, W. J. Potscavage, Jr., C. Adachi, Flat perovskite films for efficient solar cells, XXth International Krutyn Summer School 2016, Krutyn, Masurian Lake District, Poland, June 12-18, 2016.

⑧ P. K. D. Tsang, T. Matsushima, H. Nakanotani, C. Adachi Device Stability Enhancement in TADF based OLEDs, Display Week 2016, International Symposium, Seminar and Exhibition, San Francisco, California, USA, May 22-27, 2016.

⑨ T. Matsushima, S. Hwang, A. S. D. Sandanayaka, C. Qin, S. Terakawa, T. Fujihara, M. Yahiro, C. Adachi, Realization of high carrier mobilities in organic-inorganic perovskite films, 9th International Symposium on Organic Molecular Electronics (ISOME 2016),

Niigata University (Niigata), Japan, May 18-20, 2016.

⑩ T. Matsushima, A. S. D. Sandanayaka, Y. Esaki, C. Adachi, Vacuum-and-solvent-free fabrication of organic semiconductor layers for field-effect transistors, Inaugural International Conference “Frontiers in Nanoscience and Nanotechnology” (iSiTech), Sabaragamuwa, Sri Lanka, April 25-26, 2016.

⑪ M. Inoue, T. Matsushima, C. Adachi, Low amplified spontaneous emission threshold and suppression of electroluminescence efficiency roll-off in ter(9,9'-spirobifluorene), The International Symposium on Recent Advances and Future Issues in Organic Electroluminescence, Seoul, Korea, February 17-19, 2016.

⑫ T. Matsushima, T. Fujihara, C. Qin, Y. Esaki, S. Hwang, A. S. D. Sandanayaka, C. Adachi, Morphology control of organic-inorganic perovskite layers by hot isostatic pressing for efficient planar solar cells, The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PAC CHEMTM), Hawaii, USA, December 15-20, 2015.

⑬ T. Matsushima, T. Fujihara, C. Qin, S. Terakawa, Y. Esaki, S. Hwang, A. S. D. Sandanayaka, W. J. Potscavage, Jr., C. Adachi, Morphological control of organic-inorganic perovskite layers by hot isostatic pressing for efficient planar solar cells, The 7th Asian Conference on Organic Electronics 2015 (A-COE 2015), Beijing, China, October 28-31, 2015.

[図書] (計 5 件)

① 松島敏則, 有機無機ペロブスカイト LED の研究動向, 最先端の有機 EL -基礎物理・材料化学・デバイス応用と解析技術- (シーエムシー出版), 第 11 章, p.162-168, 2017

② 松島敏則, 秦川江、安達千波矢, 有機半導体デバイスの劣化とキャリアトラップ, 熱刺激電流を用いた材料・デバイス開発の最前線(シーエムシー出版), 第 II 編 第 3 章, p. 54-64, 2016.

[産業財産権]

○出願状況 (計 9 件)

①名称 : Continuous-Wave Organic Thin-Film Distributed Feedback Laser and Electrically Driven Organic Semiconductor

Laser Diode

発明者 : サンガラング ドン アトゥラ サ
ンダナヤカ, 安達千波矢, 松島敏則, 吉田
巧, ファティマ ベンシュイク, ジャン
チャールズ リビエル

権利者 : 国立大学法人九州大学

種類 : 特許

番号 : 10-2017-0027963

出願年月日 : 2017 年 3 月 3 日

国内外の別 : 国外

② 名称 : Electrically driven organic semiconductor laser diodes

発明者 : サンガラング ドン アトゥラ サ
ンダナヤカ, 松島敏則, ファティマ ベン
シュイク, 合志憲一, ジャン チャールズ
リビエル, 安達千波矢, 藤原 隆

権利者 : 国立大学法人九州大学

種類 : 特許

番号 : 特願 2017- 20797

出願年月日 : 2017 年 2 月 7 日

国内外の別 : 国内

③ 名称 : Continuous-Wave Organic Thin-Film Distributed Feedback Laser

発明者 : サンガラング ドン アトゥラ サ
ンダナヤカ, 安達千波矢, 松島敏則, 吉
田巧, ジャン チャールズ リビエル, ファ
ティマ ベンシュイク

種類 : 特許

番号 : 特願 2017-017936

出願年月日 : 2017 年 2 月 2 日

国内外の別 : 国内

④ 名称 : Film, Method for Preparation thereof and Light-emitting Device

発明者 : シン センコウ, 松島敏則, サンガ
ラング ドン アトゥラ サンダナヤカ,
安達千波矢

種類 : 特許

番号 : 特願 2017-009284

出願年月日 : 2017 年 1 月 23 日

国内外の別 : 国内

⑤ 名称 : 2次元ペロブスカイト形成用材料、
積層体、素子およびトランジスタ

発明者 : 松島敏則, シンセンコウ, 安達千波
矢

種類 : 特許

番号 : PCT/JP2016/ 83932

出願年月日 : 2016 年 11 月 16 日

国内外の別 : 国外

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松島 敏則 (MATSUSHIMA, Toshinori)
九州大学・カーボンニュートラル・エネルギー
国際研究所・准教授

研究者番号 : 40521985