

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560017

研究課題名（和文）有機半導体マイクロレーザーの作製と発振特性の研究

研究課題名（英文）Studies of organic semiconductor lasers fabrication and their lasing properties

研究代表者

佐々木 史雄 (SASAKI FUMIO)

産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・上級主任研究員

研究者番号：90222009

研究成果の概要（和文）：(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーは、室温での光学特性、伝導特性共に優れた性能を持つ新しい有機半導体材料である。我々は、この材料を用いた微小共振器形成技術を開発し、共振器量子電磁気学(Cavity Quantum Electro-Dynamics, CQED)が適用できる事に成功した。これと電流注入デバイス構造とを両立させる事ができれば、少ないキャリア注入でレーザー発振を得る事が可能になる。本提案の目標は、このような有機結晶薄膜作製技術と加工プロセスを開発することである。

研究成果の概要（英文）：(Thiophene / phenylene) co-oligomer, a new organic semiconductor materials with excellent performance both optical and conductive properties at room temperature. We have developed a microcavity formation technology using this material, and succeeded in the Cavity Quantum Electro-Dynamics can be applied. The ability to achieve both a current injection and these device structures, it is possible to obtain laser oscillation with less carrier injection. The goal of the present proposal is to develop a fabrication process and an organic crystal thin film fabrication technologies.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：応用物理・工学

科研費の分科・細目：応用物性

キーワード：有機・分子エレクトロニクス、有機半導体レーザー、微小共振器、(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー

## 1. 研究開始当初の背景

新しい結晶性有機半導体材料(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー(TPCO)は、室温で高い発光効率(40%)を示し、高密度光励起下で自然放増幅光(ASE)を発生することが報告されている。また、伝導特性も有機半導体

として優れており、将来の電流注入型有機半導体レーザーの強力な候補と考えられる。実際、TPCO単結晶を用いたField Effect Transistor(FET)では、電流注入の増大に伴い、レーザー発振の前兆とも言うべき発光スペクトルの変調が観測されている。また、こ

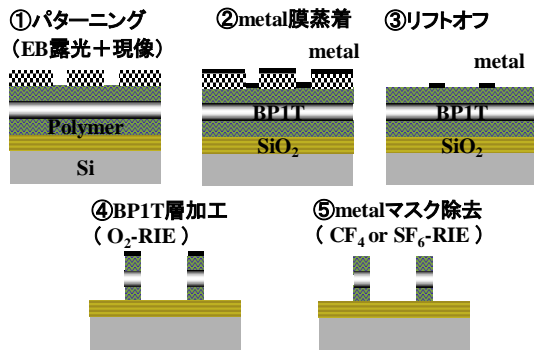


図1 メタルリフトオフを用いた微小共振器作製プロセス

の系は誘導共鳴ラマン散乱による光増幅や、超蛍光を示唆する時間遅れを伴った光増幅など、波長変換素子及び光バッファメモリなどへの応用を期待できる特徴的な光増幅過程を示すことが報告されている。有機半導体レーザーの開発に向けては、この系のレーザー発振閾値を低減する事が重要で、そのためにバルク単結晶と同程度の結晶品質を保ったまま、マイクロリングレーザーなどの微小共振器などの付加的な構造を導入し、共振器量子電磁力学 (Cavity Quantum Electrodynamics, CQED) が適用できる領域まで微細加工を施すことが効果的である。当提案者は Si 基板上に 2 通りの作製法で有機半導体マイクロディスク・リングを形成し、室温で光励起でのレーザー発振に成功した。いずれの場合も円周上の周回モード (Whispering Gallery Mode, WGM) が観測され、発振閾値もバルク薄膜部の 14-20% に低減することに成功してきた。しかしながら、発振閾値は個別の共振器を構成するマイクロ結晶の粒界・クラックに制限されており、CQED から予想されるような共振器サイズ依存性を示さなかった。当提案者らは結晶粒界を極力少なくした薄膜を作製するために、Si 基板上及び Si 基板上にコートしたポリマー膜上に高温で蒸着薄膜を成長させた。その結果、数十ミクロンの領域に渡り、アニール膜で観測された粒界がほとんど無い結晶性薄膜を得ることが出来た。基板との熱歪みのためクラックは残っているがそこを避けて一

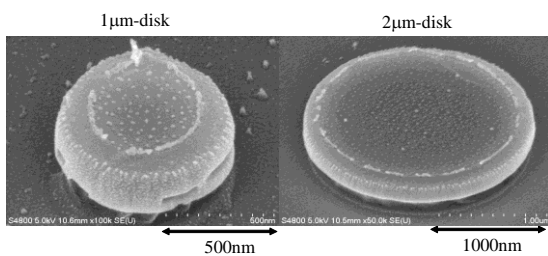


図2 直径 1,2 $\mu\text{m}$  の disk 共振器の電子顕微鏡写真

部分を切り出すことで単結晶並みの高品質な薄膜を用いた微小共振器作製が可能になった。その作製プロセスを図1に、それにより作製した共振器の SEM 写真を図2に示す。図2から分かるように直径 1,2  $\mu\text{m}$  の disk 状共振器がきちんと形成されていることがわかる。無機半導体などでは 1  $\mu\text{m}$  より小さな disk 状共振器が作製されており、共振器のモード体積として 0.1  $\mu\text{m}^3$  以下の物が世界最小レベルの disk 状共振器として報告されていた。(Z. Zhang et al. APL90 (07)111119; Q. Song et al. APL94 (09)061109) 一方、有機系では直径 3  $\mu\text{m}$  程度のマイクロピラー共振器がポリマーへの色素分散系で作製されており、自然放出光のレートを早くするパーセル効果が観測されている。(A. M. Adawi et al., Adv. Mater. 16(06)742) ダメージしにくい無機半導体や加工ダメージがあったとしても界面部分だけにとどまる分散系は比較的容易に出来る系である。一方、加工が難しい有機結晶系ではこれほどの小さな共振器が作製された報告は無く、我々が作製したこの 1 ミクロン級の disk 状共振器は有機結晶を用いた共振器としては世界最小レベルである。その結果、バルク薄膜部の 14% 程度にとどまっていた閾値低減を大幅に削減でき、およそ 2% 程度にすることに成功した。

## 2. 研究の目的

現状得られている 1  $\mu\text{m}$  級マイクロディスク共振器によるレーザー発振特性を光励起で調べ、CQED 効果が顕わに観測できることを実証する。レーザー発振閾値と共振器モード体積との関連を実験的に明らかにし、CQED が関与した閾値低減効果を実証する。また、パーセル効果など閾値低減以外の CQED 効果を時間分解発光分光などで相互実証し、有機結晶レーザーの CQED 効果を取り入れた共振器設計指針を確立する。さらに、CQED 効果と電流注入性との両立を目指したマイクロキャビティの設計・試作を行い、レーザー発振閾値のさらなる低減を通じ、光励起での連続発振と電流注入でのパルス発振を目指す。

## 3. 研究の方法

CQED 効果によるレーザー発振閾値低減を実証するために、今まで以上に加工精度を向上させ、直径 1  $\mu\text{m}$  以下のマイクロディスクを作製する手法を開発する。これを用いて、発振閾値のサイズ依存性等から自然放出結合係数  $\kappa$  を、また時間分解分光によりパーセルファクターの定量的評価を行い、閾値低減がどこまで可能になるか等、CQED 効果による TPCO 系有機半導体のレーザー共振器設計指針を確立する。この指針を元に、電流注入型デバイスの両立が可能な薄膜作製・プロセス技術を開発し、注入特性に影響が少ないプロ

セス条件を発光ダイオードや発光トランジスタ等を試作しながら確立する。これら共振器設計指針と電流注入性とを両立した作製技術を元に、電流注入型有機結晶半導体レーザーデバイスを作製する。

この課題開始時には、マイクロディスクレーザーの発振閾値において共振器直径依存性が顕わに観測される反面、自然放出結合係数は直径依存性を示さない事が問題になっていた。1つの原因として、微小共振器の側壁加工精度がまだ不十分で、小さな共振器になるほど相対的な精度が劣化していること等が考えられる。この微小共振器加工精度の向上を図り、自然放出結合係数の直径依存性が共振器モード体積に応じて変化すれば、CQED効果の関与が一層明確に確認できる。そこで、初年度は加工プロセス段階の改善をはかり、発振の閾値特性をより詳細に調べることで、自然放出結合係数がより大きくなる共振器作製プロセスを開発する。また、より直接的にCQED効果の関与が判別できるパーセル効果の定量的評価を顕微分光的な時間分解分光を行うことで実施する。また、単一モードでの発振条件を満たすdisk直径や膜厚、および屈折率など材料パラメータを明らかにする。これらの作製プロセス改善と時間分解発光分光による共振器評価などを通じ、自然放出結合係数の向上や単一モードでの発振などを通じ、さらなる光励起下での発振閾値低減を実現すべく努める。

2年目には、n型TPCO結晶薄膜の品質改善と、pn接合を含む薄膜・共振器作製プロセス改善を進めつつ、電流注入特性の向上や、そのボトルネックとなっている主要因の同定を行う。特に、LED型デバイスの薄膜作製・共振器加工プロセスを重点的に開発する。具体的には、メタルや、酸化物透明電極上への有機結晶膜の成長条件や、各種電極種類、デバイス構造を検討し、CQED効果と電流注入条件とが両立するプロセスを開発する。また、時間分解発光分光による微小共振器評価などを通じ、TPCO薄膜の加工ダメージを評価しつつ、その低減に努める。さらに、自然放出結合係数の向上や単一モードでの発振などを通じ、さらなる光励起下での発振閾値低減を実現すべく努める。

3年目の最終年度はキャリアドーピング手法により、pn接合を形成し、電流注入性の向上を図ると同時に、その基礎物性解明を進める。さらにバルク薄膜での電流注入型素子を試作し、注入効率が十分大きければpn接合を有する微小共振器作製を進め、レーザー発振に必要なデバイス化プロセスの開発に注力する。その際、1%のオーダーの発光効率を1つの指針とする。これは現状TPCO系有機半導体の単結晶を用いた貼り付け型の素子と同等の性能を有する事に対応し、この系では

かなり高い効率が実現できたことになる。逆に発光効率がそれを下回れば、まだ電流注入性が不十分である事が明らかなので、そのボトルネックとなっているn型半導体薄膜の改善、及び電極界面での接触抵抗低減などに重点を注力し、開発を進める予定である。

#### 4. 研究成果

初年度である平成22年度には、TPCO系有機半導体の内、p型であるBP1Tと言う結晶で1・m級の微小共振器の作製に成功し、光励起での発振閾値をバルク薄膜部の2%まで低減することが実現できていた。[論文⑩]本年度は同様の手法を用い、TPCO系有機半導体の内、n型であるAC5-CF<sub>3</sub>と言う材料で、やはり同様にバルク薄膜部の10%までの閾値低減に成功した。[論文⑥]光励起での発振閾値を測定した結果を図3に示す。しかしながら、図から

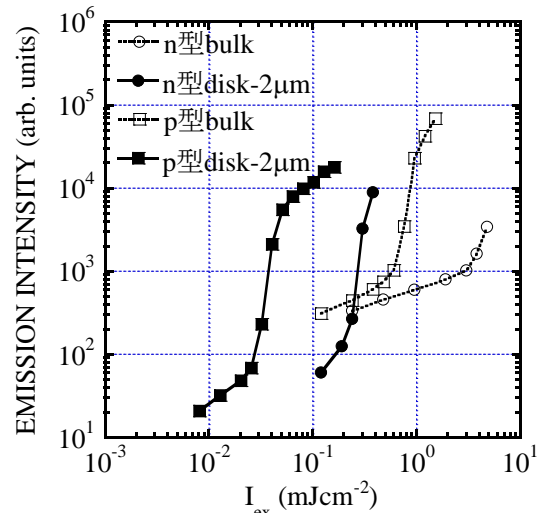


図3 発光ピーク強度の励起密度依存性

もわかるよう、n型であるAC5-CF<sub>3</sub>膜ではバルク薄膜部での発振閾値自身がまだ不十分である。現状p-n接合を有した有機ELデバイスを試作して電流注入での発光も観測できる所までこぎ着けたが、まだ注入特性は非常

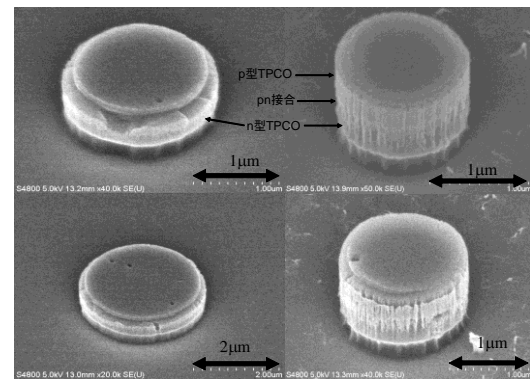


図4 直径1μm(上図)、2μm(下図)のdisk共振器、n型薄膜のみ(左図)とpn積層膜(右図)



に低く、n型薄膜の特性が光学特性と伝導特性の両面に関わっている事が判明した。この時の動作電圧が40V程度と高く、やはりn型有機半導体の品質に問題があることが明らかになりつつある。同時に、p-n接合を有する1・μm級の微小共振器の作製に成功した。そのsem写真を図4に示す。これからわかるよう、形状としてはきちんとdisk状共振器ができてはいるが、残念ながらpn接合膜は光励起でも発振しないことがわかった。上記同様n型膜の特性が不十分であることが主要因として考えられ、その点の改善を次年度以降行っていく予定である。

また、p型微小共振器における共振器モードの測定とFDTD計算との比較から、BP1Tにおける有効屈折率などの光学特性が数値的に明らかになりつつある。この結果を用いて2%の発振閾値低減の結果を評価すると、誘導放出増大効果が明らかにあることが分かってきた。これらの解析を進めると同時に、p-n接合による電流注入性の向上を次年度以降、重点的に進めていく予定である。

2年目の平成23年度には、TPCO系有機半導体のn型膜作製の改善や電流注入発光特性向上を目指したが、結晶性を担保したまま積層膜を作ることが難しく、その点での進展はあまりなかった。そこで、まず電流注入性の向上だけでも可能となるよう、p,n型にそれぞれp型、n型ドーパント(MoO<sub>3</sub>とCs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)のドーピングを共蒸着で行う事を検討した。その際、ドーピング効果を確認するためにフェルミ準位を測定する必要があり、その評価のため、EUV光を用いた光電子分光法(EUPS)を用いた。その結果、光電子分光によるTPCO分子の内核電子構造が明らかになり、分子軌道計算とかなり良い一致を示し、そのHOMO準位が確かにパイ軌道から形成されることなどが分かった[論文①]。また、ドーピングが無い場合のBP1T, AC5, AC5-CF<sub>3</sub>のフェルミ準位が求まった。その結果を図5に示す。短波長側のエッジから仕事関数が求まり、それぞれAC5の場合3.8eV, BP1Tでは4.0eV, AC5-CF<sub>3</sub>では4.8eVと求まった。

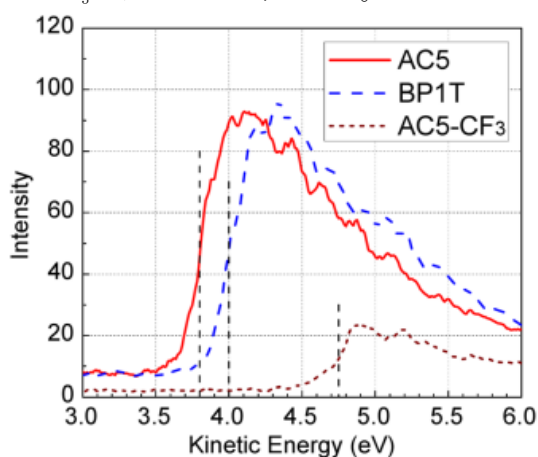


図5 EUPSの2次電子スペクトル

最終年である平成24年度には、TPCO系有機半導体の内、p型であるBP1Tとn型であるAC5-CF<sub>3</sub>の2つの材料でpn接合を形成し、電流注入での特性向上を目標にした。即ち、p,n型材料それぞれにキャリアドーピングを行い、自由キャリア密度を増大させてデバイス特性を向上させることを試みた。実際にp型ドーパントであるMoO<sub>3</sub>をBP1Tに、n型ドーパントであるCs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>をAC5-CF<sub>3</sub>にいずれも2%ドーピングした時、フェルミ準位はそれぞれ4.0eVから4.3eVへ、4.8eVから3.9eVへシフトすることが実測された。p,n型いずれの場合もドーピングによるフェルミ準位シフトは妥当な方向であることがわかった。そのドーピング試料を使った有機EL素子の特性向上も確認でき、電流値を20倍以上向上させることに成功した。また、共振器加工プロセス中の加工ダメージによる発光効率の低下が解決すべき課題に上っていたが、これも解決できる道筋が明らかになりつつある。本年度はマイクロキャビティ加工条件の改善による発光効率の向上と、pn制御による電流注入性の向上が実デバイスで確認された点、順調に進展している。この両者を兼ね備える共振器作製プロセス上の課題や、単結晶的な品質の薄膜を電極上に形成する手法など、今後解決すべき課題が明らかになった。これらの結果は、1本は国際会議で発表し、現在論文投稿準備中である。[学会発表④]

残念ながら、電流注入での発振という大きな目標は達成できなかったが、各要素技術の着実な進展に向けて、1歩ずつ近づいている実感はある。それらに繋がる課題がいくつか明らかになった点なども含め、今後も有機半導体レーザー開発を進めていく予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計12件)

①川口喜三、佐々木史雄、望月博孝、石塚知明、富江敏尚、大塚照久、渡辺秀治、下位幸弘、山雄健史、堀田収、Electronic States of Thiophene/Phenylene Co-Oligomers: EUPS Observations and DFT calculation, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 113, 2013, pp083710-1-10,

DOI: 10.1063/1.4793505

②佐々木史雄、川口喜三、望月博孝、原市聡、柳久雄、山雄健史、堀田収、(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーを用いたマイクロレーザー作製プロセスの開発、レーザー学会第433回研究会報告、RTM-12-47-11月、2012, pp11-16

<http://www.lsj.or.jp/laser/kenkyukai/433.htm>

③水野斎、白羽、丸谷祐介、石墨淳、柳久雄、佐々木史雄、堀田収、Single Crystals of 5,5-Bis(4'-methoxybiphenyl-4-yl)-2,2'-bithiophene for Organic Laser Media, *ADVANCED MATERIALS*, 24, 2012, pp 5744-5749 DOI:10.1002/adma.201202470

④水野斎、大西格、柳久雄、佐々木史雄、堀田収、Lasing from Epitaxially Oriented Needle Crystals of a Thiophene/Phenylene Co-Oligomer, *ADVANCED MATERIALS*, 24, 2012, pp2404-2408 DOI:10.1002/adma.201104182

⑤望月博孝、川口喜三、佐々木史雄、近松真之、阿澄玲子、堀田収、Optimization of thermal treatment of vapor-deposited thiophene/phenylene co-oligomer film, *JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH*, 345, 2012, pp39-43 DOI:10.1016/j.jcrysgro.2012.02.024

⑥佐々木史雄、川口喜三、望月博孝、森雅彦、原市聡、山雄健史、堀田収、n型(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー-AC5-CF3を用いたマイクロディスクレーザーの作製と積層構造を用いた有機EL発光スペクトル、電子情報通信学会技術研究報告、OME-61, 2011, pp19-24. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009466241>

⑦阪東一毅、糸田祥平、佐々木史雄、堀田収、Energy Dispersions of Anisotropic Refractive Indices of Thiophene/Phenylene Co-Oligomer Crystal, *JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 50, 2011, pp 101603-1-5 DOI:10.1143/JJAP.50.101603

⑧柳久雄、丸谷祐介、佐々木史雄、牧野吉剛、山雄健史、堀田収、Prethreshold Lasing with Time-Delayed Pulse Emission from a Single Crystal of Thiophene/Phenylene Co-Oligomer, *APPLIED PHYSICS EXPRESS*, 4, 2011, pp062601-1-3 DOI:10.1143/APEX.4.062601

⑨松岡直樹、平松徹、柳久雄、佐々木史雄、堀田収、Amplified Pulse Emissions with Variable Delay Times in Vibronic Transition Bands of Thiophene/Phenylene Co-Oligomer Single Crystals, *JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 49, 2010, pp052401-1~4, DOI:10.1143/JJAP.49.052401

⑩佐々木史雄、森雅彦、原市聡、井門靖樹、舛本泰章、堀田収、Microdisk lasers and field effect transistors of thiophene/phenylene co-oligomers by using high temperature deposition method, *ORGANIC ELECTRONICS*, 11, 2010, pp1192-1198 DOI:10.1016/j.orgel.2010.04.026

[学会発表] (計 35 件)

①水野斎、前田拓郎、柳久雄、佐々木史雄、堀田収、シアノ基置換(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー結晶からのレーザー発振(講演奨励賞受賞記念講演)、応用物理学会 2013 年 3 月 30 日、神奈川工科大学(神奈川県)

②佐々木史雄、川口喜三、望月博孝、原市聡、石塚知明、大塚照久、富江敏尚、渡辺秀治、下位幸弘、山雄健史、堀田収、(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーへのpnドーピング効果、応用物理学会 2013 年 3 月 29 日、神奈川工科大学(神奈川県)

③橋本和昌、柳久雄、佐々木史雄、山雄健史、堀田収、微細加工した(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー共振器の電界効果型トランジスタ特性、応用物理学会 2013 年 3 月 28 日、神奈川工科大学(神奈川県)

④佐々木史雄、望月博孝、原市聡、柳久雄、山雄健史、堀田収、Processing Condition Dependence of Time-Resolved Photoluminescence in Thiophene/Phenylene Co-oligomers Microcavities, Seventh International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics, 2013 年 3 月 19 日、福岡国際会議場(福岡県)

⑤佐々木史雄、望月博孝、浮田茂也、天野建、山本宗継、小森和弘、山雄健史、堀田収、有機結晶レーザー共振器・ポリマー導波路作製技術の開発: 集積光配線プリント基板から大面積有機レーザー照明への展開(依頼講演)、高分子学会 2012 年度印刷・情報記録・表示研究会講座、2013 年 2 月 5 日、産総研臨海副都心センター(東京都)

⑥望月博孝、川口喜三、佐々木史雄、堀田収、Optical properties of densely photo-excited thiophene/phenylene co-oligomers in polycrystalline states, The 12th International Symposium on Advanced Organic Photonics, 2012 年 12 月 4 日、沖縄産業支援センター(沖縄県)

⑦佐々木史雄、川口喜三、望月博孝、原市聡、柳久雄、山雄健史、堀田収、Fabrication of Microdisk Lasers by using Thiophene/Phenylene Co-oligomers and Organic Electroluminescence Property (依頼講演)、International Workshop on Green Photonic, 2012 年 10 月 3 日、Nara Institute of Science and Technology (奈良県)

⑧阪東一毅、中野多美子、加藤優一、糸田祥平、佐々木史雄、下位幸弘、堀田収、(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー結晶におけるダビドフ励起子の光学遷移観測、日本物理学会、2012 年 9 月 18 日、横浜国立大学(横浜市)

⑨渡辺秀治、下位幸弘、川口喜三、佐々木史雄、望月博孝、石塚知明、大塚照久、富江敏尚、山雄健史、堀田収、(チオフェン/フェ

ニレン) コオリゴマー (TPCO) 系有機半導体の電子状態: DFT 計算ならびに EUPS 実験、日本物理学会、2012 年 9 月 18 日、横浜国立大学 (横浜市)

⑩中島裕美、水野斎、佐々木史雄、柳久雄、p-sexyphenyl 単結晶の発光増幅特性、応用物理学会、2012 年 9 月 13 日、愛媛大学・松山大学 (愛媛県)

⑪天野建、佐々木史雄、浮田茂也、松岡康信、馬菜那、青柳昌宏、小森和弘、井戸立身、ポリマー光回路を用いた面出射光源 (招待講演)、電子情報通信学会ソサイエティ大会、2012 年 9 月 13 日、富山大学 (富山県)

⑫佐々木史雄、川口喜三、望月博孝、原市聡、柳久雄、山雄健史、堀田収、(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー共振器の加工条件改善とその有機 EL 特性、応用物理学会、2012 年 9 月 11 日、愛媛大学・松山大学 (愛媛県)

⑬望月博孝、川口喜三、佐々木史雄、堀田収、(Evaluation of amplified spontaneous emission from photopumped thiophene/phenylene co-oligomers in polycr

ystalline state, Photonics Europe, 2012 年 4 月 18 日、ブリュッセル (ベルギー)

⑭佐々木史雄、川口喜三、望月博孝、原市聡、山雄健史、堀田収、(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー微小共振器の時間分解発光、応用物理学会、2011 年 8 月 30 日、山形大学 (山形県)

⑮望月博孝、川口喜三、佐々木史雄、堀田収、TPCO 蒸着薄膜の熱処理による結晶成長の最適化、応用物理学会、2011 年 8 月 30 日、山形大学 (山形県)

⑯水野斎、石墨淳、柳久雄、佐々木史雄、堀田収、ホットウォールエビタキシ法を用いて作製した (チオフェン/フェニレン) コオリゴマー結晶からの協同的発光増幅現象、応用物理学会、2011 年 8 月 30 日、山形大学 (山形県)

⑰川口喜三、佐々木史雄、望月博孝、石塚知明、大塚照久、富江敏尚、渡辺秀治、下位幸弘、山雄健史、堀田収、(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー電子状態の EUPS による観測 (1)、応用物理学会、2012 年 3 月 18 日、早稲田大学 (東京都)

⑱佐々木史雄、川口喜三、望月博孝、原市聡、石塚知明、大塚照久、富江敏尚、渡辺秀治、下位幸弘、山雄健史、堀田収、(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー電子状態の EUPS による観測 (2)、応用物理学会、2012 年 3 月 18 日、早稲田大学 (東京都)

⑲望月博孝、川口喜三、佐々木史雄、堀田収、(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー蒸着膜の光励起増幅光に関する評価、応用物理学会、2012 年 3 月 18 日、早稲田大学 (東京都)

⑳水野斎、白羽、柳久雄、佐々木史雄、堀田収、応用物理学会、2012 年 3 月 18 日、早稲田大学 (東京都)

(21) 佐々木史雄、森雅彦、原市聡、舛本章、山雄健史、堀田収、n 型 (チオフェン/フェニレン) コオリゴマー-AC5-CF<sub>3</sub> を用いたマイクロディスクレーザの作製とその共振器モード、応用物理学会、2010 年 9 月 7 日、長崎大学 (長崎県)

[図書] (計 1 件)

柳久雄、佐々木史雄、堀田収、規則配列した  $\pi$  電子系結晶空間が示す協同的発光現象、第 3 章 12 節、高次  $\pi$  空間の創発と機能開発、シーエムシー出版、ISBN: 978-4-7813-0758-9, 2013 年 3 月 1 日発行

[その他]

ホームページ等

<http://unit.aist.go.jp/esprit/group/index.html#GRinterconnect>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐々木 史雄 (SASAKI FUMIO)

産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・上級主任研究員

研究者番号: 90222009