

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286042

研究課題名(和文)TPCO結晶の量子コヒーレンスがもたらす超放射現象

研究課題名(英文)Time-delayed emission in TPCO crystals based on quantum coherence

研究代表者

柳 久雄 (Yanagi, Hisao)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・教授

研究者番号：00220179

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：TPCO結晶の発光増幅において観測されるパルス型遅延発光の起源を明らかにするため、TPCO誘導体を用いて結晶構造や結晶サイズが及ぼす影響を調べた。BP1Tにシアノ基を置換したBP1T-CNは三斜晶に結晶化し、単斜晶のBP1Tに比べて遅延時間が短くなった。AC5およびBP3T結晶のラマン測定より、発光増幅過程に分子振動のコヒーレンスが関与していることが示唆された。p-6P結晶のサイズが小さくなるほど蛍光寿命と発光増幅励起閾値の低下が観測された。以上のことから、TPCO分子が一軸に規則配列した単結晶中では、マクロなスケールで分子振動を介して発光と励起子の間に強い相互作用が生じていると考察した。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the origin of time-delayed pulse emission observed for TPCO crystals, we investigated crystal structure and size dependence of this phenomenon using TPCO derivatives. As compared to BP1T which crystallized in a monoclinic form, a cyano-substituted derivative, BP1T-CN, crystallized in a triclinic form and showed a shorter delay time. Raman scattering spectroscopy of AC5 and BP3T crystals indicated that coherent molecular vibrations were involved in their amplified emission processes. Using size-controlled p-6P crystals, it was found that the fluorescence lifetime and threshold excitation fluence decreased as the crystal size was reduced. From these findings, we discussed that uniaxially oriented molecular packing in the TPCO crystals brought about strong light-exciton interaction mediated by molecular vibrations even in a macroscopic scale of 100 micrometer.

研究分野：有機フォトニクス

キーワード：TPCO結晶 遅延発光 超放射 量子コヒーレンス 有機レーザー

1. 研究開始当初の背景

大容量の情報を超高速で並列処理することが可能な「量子コンピューティング」への期待が高まっている。とくに、「量子」を「光」で操る情報通信は、今世紀中に実現すべき「夢」の革新技術であり、現在、半導体量子ドットや超電導素子を用いた基礎実験が進められている。一方、生物は室温で「量子」を巧みに利用している。例えば、光合成では希薄な光子を効率よく補集し、高速かつ100%の収率で光電子変換するため、膜たんぱく質を足場としてクロロフィル色素がナノメートル空間に秩序配列した集合体を形成している。とくに、光捕集アンテナ色素においては、クロロフィル二量体が環状に配列した構造をもち、光吸収した励起状態は特定の分子に局在しているのではなく、リング状の集合体全体に量子状態が非局在化している (Fig. 2)。言い換えれば、集合体中のクロロフィル分子が互いに絡み合った「量子コヒーレンス」を有していることを意味する。

本研究では、このような分子集合体における量子コヒーレンスを室温の有機固体材料で実現するため、チオフェン環とフェニレン環を鎖状に連ねた共役オリゴマーである thiophene/phenylene co-oligomer (TPCO) を用いる。TPCO はチオフェンとフェニレンの結合順序やその π 共役長により電子状態を自在に制御でき、可視光域でチューナブルな強い蛍光を示す。また、分子骨格の対称性や置換基を選択することにより、分子間相互作用の異なる会合体構造をもつ薄板状や針状の低次元結晶を成長させることができる。これまでに我々は、TPCO 低次元結晶を短パルスレーザーで強励起すると、結晶自身が共振器として働いたレーザー発振を示すことを報告している。TPCO は、これまで結晶を共振器としてレーザー発振が得られた最初の有機材料である。さらに、レーザー発振閾値より低い励起密度領域において、励起時間原点から300 psにも及ぶ遅延時間を伴ったパルス型の狭線化発光を示すことを見出している。この特異な発光は、励起状態が結晶全体にコヒーレントに広がった集団励起子からの超放射である可能性がある。これまで類似の超放射現象は、 $KCl:O_2$ などの無機結晶を用いて極低温で報告されているが、室温で有機結晶から明確な遅延発光を観測したのは我々が初めてである。最近の研究により、集団励起子の生成にはコヒーレントな分子振動緩和が関与しており、パルス型遅延発光の超放射特性は、結晶中での分子配向や会合状態に強く依存することが示唆されている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、このような TPCO 結晶の発光増幅過程において観測された超放射現象と思われるパルス型の遅延発光の起源を明らかにするため、以下の研究を行うことを当初の目的とした。

- (1) 様々な分子骨格と置換基をもつ TPCO 誘導体を合成し、分子設計により所望の会合体構造を得るための分子結晶エンジニアリングを確立する。
- (2) 構造設計された TPCO 結晶を用いて、ポンプ・プローブ法による縮退四光波混合や分子振動波束干渉などの超高速非線形分光測定を行い、超放射の起源として予想される TPCO 集合体をもたらす「量子コヒーレンス」の実体を解明する。
- (3) 半導体微細加工技術と有機エレクトロニクスを融合することにより、TPCO 結晶が示す「量子コヒーレンス」を利用した有機レーザーや光バッファメモリ、単一光子光源など、次世代の有機フォトンデバイスへの応用を目指す。

3. 研究の方法

(1) TPCO 誘導体分子の結晶成長

TPCO はチオフェン環とフェニレン環の連結により、分子対称性の異なる分子群を形成する。これまでに連携研究者の堀田らにより、21 種類の分子骨格が合成されている。さらに TPCO に置換基を導入すればその多様性が広がり、すでに BP1T、BP2T、AC5 の分子両末端に -CN、-OCH₃、-CF₃ 基を導入した誘導体が合成されている。これらの TPCO は液相や気相からの成長により良質の単結晶が得られ、これまでに 8 種類の TPCO の X 線単結晶構造解析がなされている。TPCO 結晶中では、分子骨格と末端基の分子間相互作用に依存して多彩な分子パッキングを取りうる。例えば、無置換の BP1 は単斜晶系をとるのに対して、その分子両末端に -OCH₃ 基を導入した BP1T-OMe は斜方晶系をとる。また、BP1T-OMe は分子骨格が bent 型であるため、分子の遷移双極子が *c*-軸に平行に配列した H 会合体構造をもつ。このように、分子骨格が zigzag 型の BP2T に -OCH₃ 基を導入した BP2T-OMe は分子の遷移双極子が *c*-軸に対して交互に逆方向に斜立した J 会合体構造をもつ。このような多様な分子パッキングに依存して、TPCO 誘導体の発光

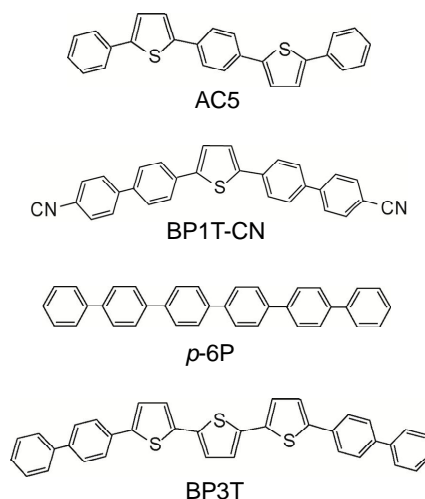


図1 使用した TPCO 誘導体の分子構造

増幅特性は結晶中での分子間相互作用の違いによって影響を受けることが予想される。そこで本研究では、TPCO 誘導体のうち、図 1 に示した AC5, BP1T-CN, BP3T および phenylene oligomer である *p*-6P を用いて気相成長法あるいは溶液成長法により単結晶の作製を行った。気相成長法では、TPCO 試料を減圧した窒素ガスでガラス管に封入し、チューブ炉にて加熱することにより昇華させ、対流冷却により管壁上部に単結晶を析出させた。溶液成長法では、TPCO 試料を 1,2,4-trichlorobenzene に加熱溶解した後、徐冷することにより単結晶を析出させた。得られた単結晶のうち、これまでに結晶構造解析がなされていない BP1T-CN については X 線回折測定を行った。

(2) TPCO 誘導体結晶の発光増幅特性の測定

TPCO 単結晶から観測されるパルス型の遅延発光現象に及ぼす結晶構造や分子パッキングの影響を調べるため、(1)で作製した誘導体結晶を用いて、発光増幅実験を行った。TPCO 結晶をチタンサファイアレーザーの 2 倍波 ($\lambda_{2\omega}=397$ nm、パルス幅: 200 fs、周波数 1 kHz) で光ポンプし、結晶端から放射した発光スペクトルの励起エネルギー密度依存性を液体窒素冷却 CCD 分光器を用いて測定した。また、発光を分光器を通してストリークカメラに導入することにより時間分解スペクトル測定を行った。さらに、TPCO 結晶中の分子振動が遅延発光現象に及ぼす影響を調べるため、Nd:YAG/OPO パルスレーザー ($\lambda=450$ -600 nm、パルス幅 16 ns、周波数 10 Hz) を励起光源に用いて発光スペクトルおよびラマン散乱スペクトルの励起波長依存性を測定した。これらの分光測定は、主に室温大気下で行ったが、BP3T 結晶を用いたラマン散乱測定は 12K のクライオスタット中で行った。

(3) 発光増幅特性の結晶サイズ依存性

TPCO 結晶が示す遅延時間を伴った発光増幅現象に及ぼす結晶サイズの影響を調べるため、溶液成長条件を制御することによりサイズの異なる *p*-6P 単結晶を作製した。また、得られた結晶をレーザーエッチング法により、1 辺の長さが 10~100 μm の正方形の単結晶に加工した。レーザーエッチングには光源として Nd:YAG/OPO パルスレーザー ($\lambda=355$ nm、パルス幅 6 ns、周波数 10 Hz) を用い、可変スリットと 50x 対物レンズを通して均一化したビーム (500 x 500 μm^2) を試料結晶表面に照射しながら結晶を手動マニピュレータで移動することによりエッチングを行った。得られた様々なサイズの *p*-6P 単結晶を用いて、(2)と同様の発光増幅特性の測定を行った。

4. 研究成果

(1) TPCO 誘導体分子の結晶エンジニアリング

本研究で用いた TPCO 分子(図 1)のうち、AC5 と *p*-6P は溶液成長により、BP1T-CN と

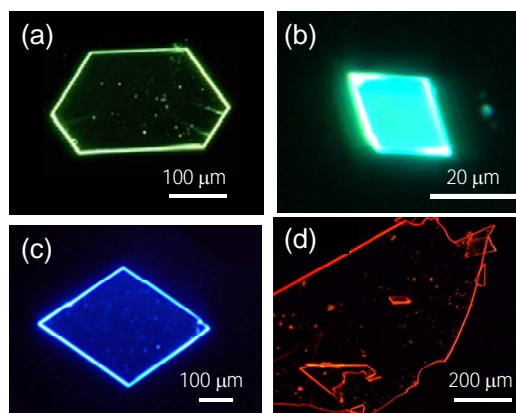


図 2 AC5 (a), BP1T-CN (b), *p*-6P (c), BP3T (d) 結晶の蛍光顕微鏡像

BP3T は気相成長により結晶化を行った。図 2 に得られたそれぞれの単結晶の蛍光顕微鏡像を示す。いずれも薄板状の結晶が成長しているが、分子構造により HOMO/LUMO ギャップエネルギーが変化するため、RGB の異なる発光色を示す。AC5, *p*-6P, BP3T については結晶のエッジ部分が強く発光していることがわかる。これらの結晶は単斜晶系をとることがわかっており、分子軸に平行な遷移双極子モーメントが結晶面に対してほぼ垂直に配向するため、発光は結晶面内方向に閉じ込められて伝搬する。一方、対照的に BP1T-CN では結晶面が明るく発光している。今回、BP1T-CN 単結晶の X 線構造解析を行ったところ、これまでの TPCO では報告例のない三斜晶系 ($P-1$, $a = 3.84$, $b = 16.15$, $c = 18.02$ Å, $\alpha = 111.87^\circ$, $\beta = 94.27^\circ$, $\gamma = 90.43^\circ$, $Z = 2$) をとっていることがわかった。その結果、分子軸が結晶面に対して 22° の角度をなして傾いており、この斜立した分子配向によって、BP1T-CN 結晶では発光が結晶の上面から放射する。この BP1T-CN 結晶の特異な配向には、隣接する分子のシアノ基間のクーロン相互作用が影響を及ぼしている。このことは、TPCO の分子骨格だけでなく置換基を修飾することにより結晶エンジニアリングを可能にすることを示している。

(2) TPCO 結晶の分光測定と量子コヒーレンス

これまで我々は、数種の TPCO 誘導体単結晶を用いて光励起発光増幅実験を行い、レーザー発振の励起密度閾値前後で特異なパルス型遅延発光が得られることを報告してきた。特に BP1T の分子末端にメトキシ基を導入した BP1T-OMe 結晶において、励起時間原点から最大 300 ps の遅延時間が生じることを見出している。BP1T-OMe 結晶は単斜晶系の BP1T とは異なる斜方晶系をとることから、結晶中での分子パッキングがこの遅延発光現象に影響を及ぼすと予想している。そこで今回、(1)で得られた新しい三斜晶系をとる BP1T-CN 結晶を用いて発光増幅実験を行った。図 3 に示した BP1T-CN 結晶をチタンサファイアレーザーで光励起したときに得ら

れるレーザー発振スペクトルとその励起閾値前後における発光強度の時間分解プロファイルを示す。(a)に現れている複数の発光ピークは、結晶の両端面を Fabry-Pérot 共振器とする面内発光の縦マルチモードレーザー発振によるものである。この発振励起閾値前後の発光強度の時間プロファイル(b)を見ると、低励起密度領域では自然蛍光の緩やかな減衰を示しているのに対して、発振前の $9.9 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ においてパルス型に変化し、このとき時間原点から 7 ps 程遅延しているのが見られる。他の結晶についても観測したところ、遅延時間はいずれも 20 ps 以下であり、BP1T-OMe 結晶の 300 ps に比べて非常に短い結果となった。BP1T-OMe は斜方晶中で直立した隣接分子が平行にパッキングしているのに対して、BP1T-CN は三斜晶中で斜立した分子がスリップしながらパッキングしている。そのため、BP1T-CN 結晶中では励起子間の相互作用が弱いことが遅延時間に影響していると考えられる。

次に、図 2 に示した AC5 および BP3T 結晶を用いて発光スペクトルの励起波長依存性を測定した。いずれの結晶においても、共鳴吸収帯の波長で励起すると自然増強発光 (ASE) が得られるが、励起を長波長側にシフトさせると強いラマン散乱ピークが観測される。図 4 は、BP3T 結晶の自然蛍光の励起スペクトル(赤線)とラマン散乱強度の励起波長依存性をプロットしたものである。非共鳴

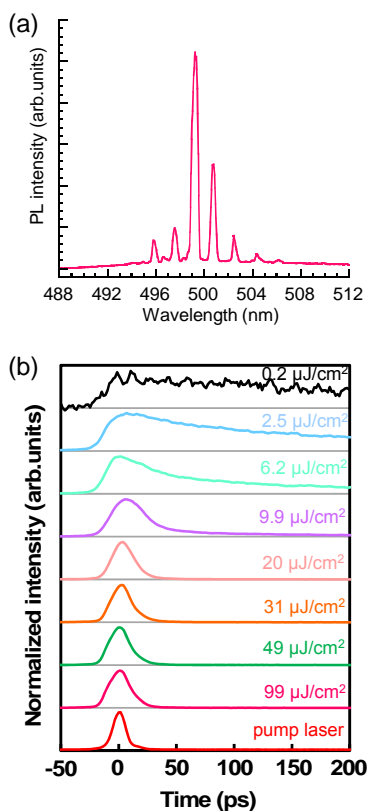


図 3 BP1T-CN 結晶のレーザー発振スペクトル(a)と時間分解発光プロファイル(b)

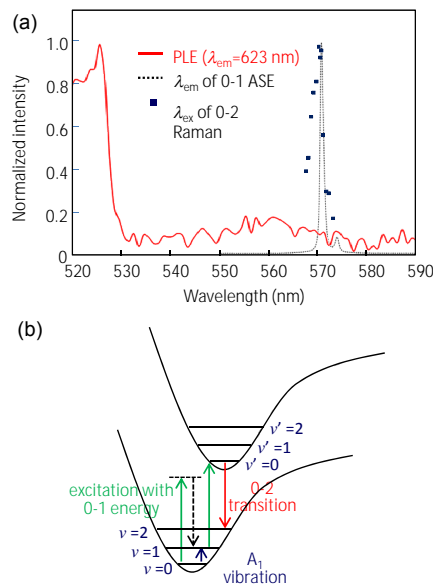


図 4 BP3T 結晶の 0-2 ラマン強度の励起波長依存性(a)とその発生機構の概略図(b)

領域にもかかわらず、0-1 帯の ASE に対応する波長で励起したとき選択的に 0-2 帯にラマンピークが現れることがわかる。これは、図 4(b)に示すように、0-1 帯に対応するエネルギーで励起したときに結晶中にコヒーレントな分子振動が生成し、基底状態の第一振動励起状態 ($v = 1$) から励起状態の振動基底状態 ($v' = 0$) への共鳴吸収を経て 0-2 帯に対応するエネルギーのラマン散乱が起こったと考えられる。TPCO 分子が高度に一軸配向した結晶中ではこのような分子振動のコヒーレントな緩和が起こり、それが遅延発光現象にも関与していると推察される。

(3) サイズ制御した TPCO 結晶の発光特性

次に TPCO 結晶の発光増幅特性に及ぼす結晶サイズの影響を明らかにするため、レーザーエッチング法により加工した p -6P 結晶を用いて蛍光寿命と ASE 励起閾値のサイズ依存性を調べた。図 5(a)に示すように、大きく成長した菱形の p -6P 単結晶を 1 辺が $10, 20, 50, 100 \mu\text{m}$ の正方形にエッチング加工した。これらの結晶をチタンサファイアレーザーで光励起すると ASE が得られたが、その励起密度閾値 (P_{th}) は、図 5(b)に示すように、結晶の体積(サイズ)が小さくなるほど低下した。これは、通常増幅媒質では利得距離が大きくなるにつれて閾値が小さくなる傾向とは逆である。また、弱励起下での自然蛍光の寿命 (τ_f) もサイズが小さくなるほど短くなった。このような傾向は、サイズが波長スケールのマイクロキャビティ中で放射が閉じ込められた光の電磁場によって増強される cavity QED や Purcell 効果として知られている。図 5(b)に示すように、Purcell 効果の大きさを表す係数 (F_p) は、絶対値は小さいものの p -6P 結晶のサイズが小さくなるほど増大していることがわかる。マイクロキャビティで見られ

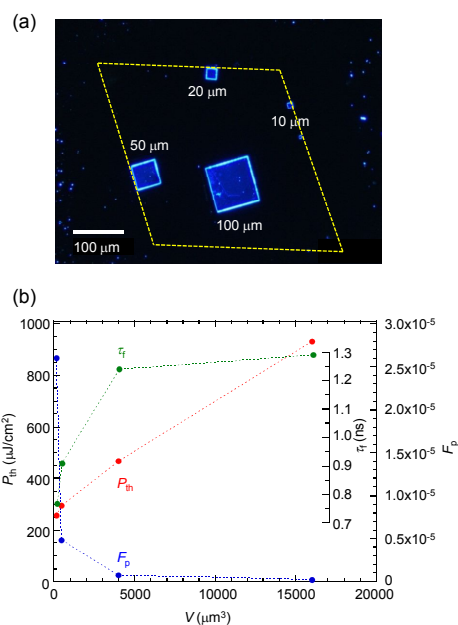


図5 レーザー加工した p -6P 結晶の蛍光顕微鏡像 (a) と 蛍光寿命および ASE 励起閾値のサイズ依存性 (b)

このような効果が今回用いた 100 μm スケールのマクロな結晶キャビティにおいても成り立つかは今後さらに詳細に検討する必要があるが、大きな振動子強度をもつ鎖状の TPCO 分子が高度に一軸配向した結晶場においては、光と励起子の広域にわたる相互作用が生じている可能性がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

Y. Ono, F. Sasaki, and H. Yanagi, "Fluorescence and amplified emission properties of single-crystal 2,5-bis(4-biphenyl)thiophene," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* in press. 査読有
DOI:10.1080/15421406.2015.1096436

K. Hashimoto, F. Sasaki, S. Hotta, and H. Yanagi, "Amplified emission and FET characteristics of one-dimensionally structured 2,5-bis(4-biphenyl)thiophene crystals," *J. Nonosci. Nanotechnol.* **16**(4), 3200-3205 (2016). 査読有
DOI:10.1166/jnn.2016.12285

Y. Tanaka, K. Goto, K. Yamashita, T. Yamao, S. Hotta, F. Sasaki, and H. Yanagi, "Vertical cavity lasing from melt-grown crystals of cyano-substituted thiophene/phenylene co-oligomer," *Appl. Phys. Lett.* **107**(16), 163303/5 pages (2015). 査読有
DOI: 10.1063/1.4934588

S. Dokiya, Y. Ono, F. Sasaki, S. Hotta, and H. Yanagi, "Organic light-emitting diodes with heterojunction of thiophene/phenylene co-oligomer derivatives," *J. Nonosci. Nano-*

technol. **16**(4), 3194-3199 (2016). 査読有
DOI: 10.1166/jnn.2016.12303

R. Hirase, M. Ishihara, T. Katagiri, Y. Tanaka, H. Yanagi, and S. Hotta, "Alkylmonosubstituted thiophene/phenylene co-oligomers: Synthesis, thin film preparation, and transistor device characteristics," *Org. Electron.* **15**(7), 1481-1492 (2014). 査読有
DOI:10.1016/j.orgel.2014.04.010

K. Yamashita, T. Nakahata, T. Hayakawa, Y. Sakurai, T. Yamao, H. Yanagi, and S. Hotta, "Vertical cavity surface emitting lasing from cyano-substituted thiophene/phenylene co-oligomer single crystals," *Appl. Phys. Lett.* **104**(25), 253301/4 pages (2014). 査読有
DOI:10.1063/1.4885382

H. Yanagi, K. Tamura, Y. Tanaka, and F. Sasaki, "Optically pumped lasing from single-crystal cavity of p -phenylene oligomer," *Advances in Natural Sciences: Nonoscience and Nanotechnology* **5**, 045013/4 pages (2014). 査読無
DOI:10.1088/2043-6262/5/4/045013

M. Maruyama, T. Yamao, S. Hotta, and H. Yanagi, "Hybrid crystals based on thiophene/phenylene co-oligomers," *Displays*, **34**(5), 442-446 (2013). 査読有
DOI:10.1016/j.displa.2013.08.010

H. Yanagi, Y. Marutani, N. Matsuoka, T. Hiramatsu, A. Ishizumi, F. Sasaki, and S. Hotta, "Resonant stimulation of Raman scattering from single-crystal thiophene/phenylene co-oligomers," *Appl. Phys. Lett.* **103**(24), 243301/4 pages (2013). 査読有
DOI:10.1063/1.4842216

F. Sasaki, H. Mochizuki, S. Haraichi, H. Yanagi, T. Yamao, and S. Hotta, "Processing condition dependence of time-resolved photoluminescence in thiophene/phenylene co-oligomers microcavities," *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**(1S), 01AD07/4 pages (2014). 査読有
DOI:10.7567/JJAP.53.01AD07

[学会発表] (計 42 件)

H. Yanagi, "FET and optically pumped lasing of epitaxially grown microneedles with phenylene/thiophene oligomers," Energy Materials Nanotechnology (EMN) Meeting on Field-Effect Transistors, March 15, 2016, Kaohsiung, Taiwan.

土器屋翔平, 佐々木史雄, 柳久雄, "蒸着膜転写法によるシアノ基置換 TPCO 誘導体多結晶膜からの発光増幅特性", 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 20 日, 東京工業大学 (東京都目黒区) 鳥井一輝, 水野圭, 阪東一毅, 佐々木史雄, 柳久雄, "エピタキシャル成長させた TPCO 単一ニードル結晶からの光励起レーザー発振", 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 20 日, 東京工業大学 (東

京都目黒区)

後藤要, 山下兼一, 山雄健史, 堀田収, 佐々木史雄, 柳久雄, “TPCO 微小共振器の反射特性による光子-励起子相互作用の評価”, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 2015年9月13日, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

S. Dokiya, Y. Ono, F. Sasaki, S. Hotta, and H. Yanagi, “Organic light-emitting diodes with heterojunction of thiophene/phenylene co-oligomer derivatives,” 11th International Conference on Nano-Molecular Electronics, December 18, 2014 神戸国際会議場(兵庫県神戸市)

大森健三, 堀江徹, 柳久雄, 香月浩之, “光位相変調技術を用いた量子干渉イメージの制御”, 第25回光物性研究会, 2014年12月12日, 神戸大学(兵庫県神戸市)

柳久雄, 田村健次, 田中庸介, 佐々木史雄, “TPCO 誘導体単結晶の光励起レーザー発振”, レーザー学会第433回研究会「有機固体レーザー」, 2014年11月28日, 京都工芸繊維大学(京都府京都市)

H. Yanagi, K. Tamura, Y. Tanaka, and F. Sasaki, “Optically pumped lasing from single-crystal cavity of *p*-phenylene oligomer,” The 7th International Workshop on Advanced Materials Science and Nanotechnology, November 6, 2014, Ha Long City, Vietnam.

Y. Ono, F. Sasaki, and H. Yanagi, “Fluorescence and amplified emission properties of single-crystal 2,5-bis(4-biphenyl)thiophene,” KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics, September 22, 2014(茨城県つくば市)

柳久雄, 田村健次, 田中庸介, 佐々木史雄, “*p*-sexiphenyl 単結晶キャビティの光励起レーザー発振”, 第75回応用物理学会学術講演会, 2014年9月18日, 北海道大学(北海道札幌市)

佐々木史雄, 望月博孝, 原市聡, 柳久雄, 山雄健史, 堀田収, “有機結晶からなるマイクロディスク共振器のパーセル効果”, 第61回応用物理学会春季学術講演会, 2014年3月18日, 青山学院大学(神奈川県相模原市)

小野静之, 柳久雄, 佐々木史雄, 堀田収, “2,5-Bis(4-biphenyl)thiophene の結晶成長と発光増幅特性”, 第61回応用物理学会春季学術講演会, 2014年3月19日, 青山学院大学(神奈川県相模原市)

風間達, 香月浩之, 柳久雄, “有機分子性結晶における空間コヒーレンス観測系の構築”, 応用物理学会関西支部平成25年度第3回講演会, 2014年2月28日, 大阪大学(大阪府吹田市)

水野斎, 香月浩之, 柳久雄, 佐々木史雄, 堀田収, 大森賢治, “(チオフェン/フェニレ

ン)コオリゴマー単結晶のレーザー発振ダイナミクス”, 応用物理学会関西支部平成25年度第2回講演会, 2013年10月9日, 奈良先端科学技術大学院大学(奈良県生駒市)

H. Mizuno, H. Katsuki, H. Yanagi, F. Sasaki, S. Hotta, and K. Ohmori, “Observation of interferometric structure in fluorescence from thiophene/phenylene co-oligomer crystal,” The 10th Conference on Laser and Electro-Optics Pacific Rim, July 3, 2013(京都府京都市)

〔図書〕(計 1件)

H. Yanagi, H. Mizuno, F. Sasaki, and S. Hotta, Chemical Science of π -Electron Systems (Ed. T. Akasaka, A. Osuka, S. Fukuzumi, H. Kandori, and Y. Aso), Springer, 2015. Chapter 38. “Light Amplification in Low-Dimensional Crystals of Thiophene/Phenylene Co-Oligomer Derivatives”, p.635-654.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳久雄(YANAGI, Hisao)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・教授

研究者番号: 00220179

(2) 研究分担者

香月浩之(KATSUKI, Hiroyuki)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・准教授

研究者番号: 10390642

(3) 連携研究者

佐々木史雄(SASAKI, Fumio)

独立行政法人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

(4) 連携研究者

堀田収(HOTTA, Shu)

京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・教授

研究者番号: 00360743