

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02172

研究課題名(和文) TPCOが自己組織化した低次元キャビティの導入による電流励起有機レーザーの実現

研究課題名(英文) Self-organized low-dimensional cavity structures of TOCOs towards electrically pumped organic lasers

研究代表者

柳 久雄 (Yanagi, Hisao)

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：00220179

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：電流励起による有機レーザーの実現に向けて、(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー(TPCO)を低次元単結晶化した共振器キャビティが、光励起下において低励起閾値エネルギーで発振する良質な有機レーザー媒質であることを示した。次に、TPCO誘導体蒸着膜を積層したpn接合型のVCSELを作製し、そのELスペクトルの角度分解測定から、電流注入した励起子と光子が結合した励起子ポラリトンに基づく電界発光が得られることを確認した。さらに、励起子ポラリトンのエネルギー分散特性を導き、異常なスペクトル分裂を伴った遅延発光増幅現象が、コヒーレントな分子振動をまとった励起子ポラリトンに起因することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有機太陽電池や有機ELデバイスにおいて、スピン状態が関わるシングレットフィッションや熱活性化遅延蛍光による高効率化が注目されている。これらの過程では、電子が分子内に閉じ込められたフレンケル励起子で解釈され、励起子と分子振動やフォノンの結合が関与が示唆されており、前者では一重項励起子が分子振動を介して三重項励起子ペアの中間状態を経て開裂し、後者では三重項励起子がコヒーレント振動により非局在化して一重項に逆項間交差する。本研究では、このような分子振動のコヒーレンスが介在した励起子の非局在化による相関がVDEPを通して明瞭に実証され、今後、有機ポラリトンレーザーのみならずその展開分野は幅広い。

研究成果の概要(英文)：Towards electrically pumped organic lasers, low-dimensional single-crystal cavities are fabricated using thiophene/phenylene co-oligomers (TPCOs).

Firstly, single crystals of TPCOs demonstrated superior organic lasing characteristics under optical pumping at low threshold fluence. Secondary, a vertical cavity surface emitting cell (VCSEL) is fabricated using p/n junction layers of TPCO derivative films vapor-deposited on a distributed Bragg reflector (DBR) mirror, and their angle-resolved electroluminescence spectra exhibited the formation of exciton-polaritons resulting from strong coupling between cavity-photons and electrically injected excitons. Thirdly, the energy dispersion characteristics of exciton-polaritons optically generated in the platelet crystals of TPCO reveal that the observed time delayed amplified emission accompanied with extraordinary spectral splitting originates from the exciton polaritons dressed by coherent molecular vibrations.

研究分野：有機フォトニクス

キーワード：有機レーザー TPCO マイクロキャビティ ポラリトンレーザー

1. 研究開始当初の背景

本研究を開始するまでに、我々は強発光性の π 共役オリゴマーである(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー (TPCO) の低次元結晶を Fabry-Pérot (F-P) 共振器とするエッジ発光型レーザー発振や、TPCO 結晶を DBR ミラーで挟んだマイクロキャビティからの面発光型レーザー発振を光励起下で実現している (Fig. 1a)。また、TPCO 単結晶をパルスレーザーで強励起したときに、励起時間原点から 300 ps にも及ぶ時間遅れを伴ったパルス型遅延発光 (Fig. 1b) が室温で放射することを観測している。このような発光遅延現象は、極低温での無機半導体量子井戸を用いたマイクロキャビティにおいて報告されており、キャビティ内に閉じ込められた光子と励起子の強結合により生成した励起子ポラリトンが、フォノン放出と誘導散乱を経て最低エネルギー状態に凝縮するまでの時間が遅延として現れると解釈されている (Fig. 1c)。この凝縮状態からのポラリトンレーザーは、通常の誘導放射による光子レーザーの発振閾値より低い励起密度領域で起こることから、電流励起有機レーザーの実現に向けて新しいアプローチとして注目されている。我々が観測した遅延発光はポラリトンレージングに酷似しているが、なぜ室温において外部共振器をもたないマクロ ($\sim 100 \mu\text{m}$) な結晶で Rabi 分裂エネルギーの大きな励起子ポラリトンが形成しうるのか、また遅延発光が異常なスペクトル分裂を伴って現れることや、非共鳴励起下でラマン散乱の選択的な増幅が見られることなど不明な点が多く残されていた。

このような TPCO 低次元結晶が示す特異な発光増幅現象を説明することは、電流励起有機レーザーを実現するうえで課題となっている。レーザー発振励起閾値エネルギーの低減、電流注入励起子による励起子失活、非発光性の三重項励起子問題を解決する上でも重要と考え、本研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電流励起による有機レーザーの実現に向けて上記3点の課題を解決することである。そのため、ロバストな活性媒質である TPCO の低次元結晶を用いて共振器キャビティ構造を作製し、その光励起下および電流励起下での発光増幅挙動を評価することにより、励起子ポラリトンに基づく有機レーザーの可能性を実証することである。

まず、電流励起有機レーザー実現の前提条件である光励起下における発光増幅を確認するため、TPCO が自己組織結晶化した低次元結晶を作製し、TPCO 低次元単結晶が外部共振器を導入することなく、の課題である低励起閾値エネルギーで発振する良質な有機レーザー媒質であることを示す。

次に、の課題に対して、DBR ミラー上に TPCO 誘導体蒸着膜を積層した pn 接合型の垂直共振器型電界発光素子 (VCSEL) を作製し、その EL スペクトルの角度分解測定から、電流注入した励起子と共振器内に閉じ込められた光子が結合した励起子ポラリトンに基づく電界発光が得られることを実証する。

さらに、の課題については、二次元薄板状 TPCO 単結晶から得られる光励起レーザー発振スペクトルから励起子ポラリトンのエネルギー分散特性を導き、前述した異常なスペクトル分裂を伴った遅延発光増幅現象の起源を明らかにし、三重項励起子問題との関連を考察する。

3. 研究の方法

(1) TPCO 低次元結晶を用いた共振器キャビティ構造の作製とレーザー特性の測定

試料として、5,5'-bis(4'-cyano-biphenyl-4-yl)-2,2'-bithiophene (BP2T-CN)、5,5'''-Bis(4-biphenyl)-2,2':5',2''-quaterthiophene (BP4T)、5,5''-bis(biphenyl)-2,2':5',2'''-terthiophene (BP3T) の三種の TPCO を用いた。

BP2T-CN 結晶は N,N-dimethylformamide (DMF) に分散した試料粉末を 120°C に加熱して溶解させた後、室温まで徐冷して結晶を析出させた。得られた結晶は、従来の気相成長法による薄板状の形態とは異なり、Fig. 2a の蛍光顕微鏡像に示すようにナノワイヤ状に成長した。

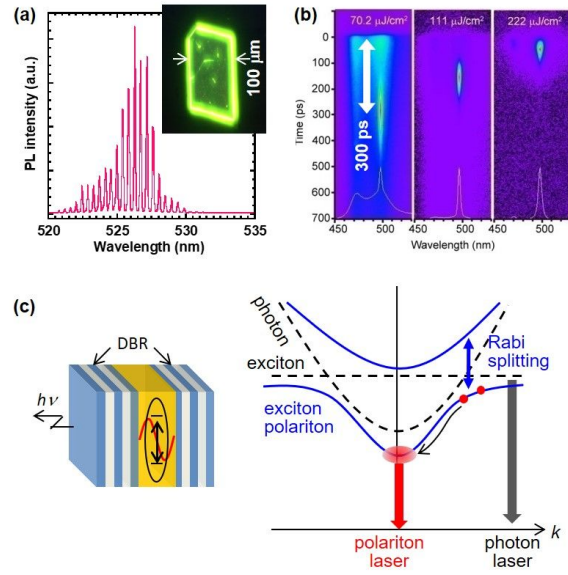


Fig. 1 TPCO 低次元結晶のレーザー発振 (a)、遅延発光プロファイル (b) とマイクロキャビティを用いたポラリトンレーザーの模式図。

BP3T および BP4T 結晶は試料粉末を 190°C の 1,2,4-trichlorobenzene に溶解させた飽和溶液を調製し、これに同溶媒を一定量加え希釈した。その後再び 190°C まで加熱し 15-36 時間かけて 30°C まで徐冷することにより、薄板状結晶が得られた。Fig. 2b に BP4T 結晶の蛍光顕微鏡像を示す。図より、平行四辺形の結晶のエッジのみから発光が観察されていることから、欠陥のない良好な二次元単結晶キャビティとして機能することがわかる。

得られたこれらの低次元結晶はタンゲステン細針を用いてガラス基板上に選別、転写後、乾燥させて光学測定用試料とした。レーザー特性は、励起光源として Nd:YAG パルスレーザー (波長 355 nm、パルス幅 1.1 ns、1.2 kHz) および Ti:S フェムト秒パルスレーザー (波長 397 nm、パルス幅 150 fs、1 kHz) をストライプ状に絞って試料に照射し、発光スペクトルと発光強度の励起密度依存性を測定した。

(2) pn接合型VCSELの作製とELスペクトルの角度分解測定

シアノ置換したTPCOはn型の半導体性をもつに対し、無置換体のTPCOはp型の半導体性をもつため、これらを積層することによりp/n接合が形成できる。そこで、下部電極であるITOガラス上にDBRミラーをスパッタリングした基板に無置換体 5,5''-bis(biphenyl)-2,2':5',2''-bithiophene (BP2T)とBP2T の両末端をシアノ置換した5,5'-bis(4'-cyano-biphenyl-4-yl)-2,2'-bithiophene (BP2T-CN)を真空蒸着し、その上部に正孔注入層の酸化モリブデンと金電極を積層したマイクロキャビティ型のOLED構造をもつVCSELを作製した。Fig. 3にその素子構造と素子表面から得られた電界発光の様子を示す。

この素子を用いて、電流励起下における励起子ポラリトンの生成を調べるため、電界発光スペクトルの角度依存性と発光強度の電流密度依存性を測定した。

(3) 励起子ポラリトンのエネルギー分散特性の評価

(1), (2)の結果を踏まえて、TPCO低次元結晶において観測される時間遅延とスペクトルの異常分裂を伴ったレーザー発振における励起子ポラリトンの関与を明らかにするため、5,5''-bis(biphenyl)-2,2':5',2''-terthiophene (BP3T)単結晶を作製し、発光スペクトルの励起密度依存性と時間分解特性を測定した。異常分裂したレーザー発振スペクトルにおいて、スペクトルの縦モード間隔の値を用いてF-P共振方向の波数(k)を算出し、それらのエネルギー(E)分散プロット(E - k 分散プロット)を作成することにより励起子ポラリトン挙動を評価した。

4. 研究成果

Fig. 4 に、BP2T-CN ナノワイヤ結晶と BP4T 薄板状結晶のレーザー発振スペクトルおよび発光強度の励起密度依存性を示す。前者では、Ti:S フェムト秒パルスレーザーを用いた励起密度の上昇に伴って $\lambda = 550$ nm 付近の 0-1 振電遷移帯の発光強度が非線形的に増大するとともに発光帯が狭線化し (Fig. 4b) $140 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ の励起密度閾値以上でレーザー発振が得られた (Fig. 4a) 発振時の蛍光顕微鏡像において、ナノワイヤ結晶の末端から強い発光が放射していることから、結晶が一次元の共振器キャビティとして機能していると考えられる。

一方、BP4T の薄板状結晶では、Nd:YAG パルスレーザーを用いた励起密度の上昇に伴って $\lambda = 655$ nm 付近の 0-2 振電遷移帯の発光が優先的に狭線化増幅し、 $30 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ の励起密度閾値以上でレーザー発振が得られた (Fig. 4c,d) そのスペクトルに見られるレーザー発振のモード構造と平行な結晶両端面より求めた共振器長から、Q 値 = 5,900 と有効屈折率 $n_g = 3.5$ というともに高い値が得られ、BP4T の薄板状結晶が低励起閾値エネルギーでレーザー発振する良質な二次元共振器キャビティとして機能していることがわかった。

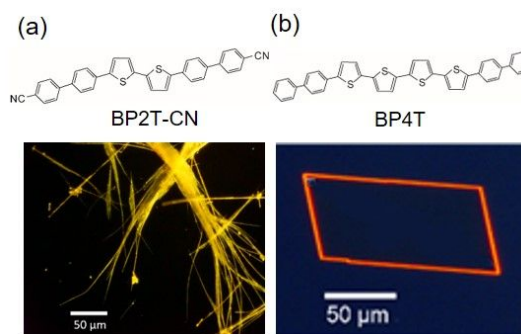


Fig. 2 TPCO 低次元結晶の蛍光顕微鏡像 . (a) BP2T-CN ナノワイヤ, (b) BP3T 薄板状結晶 .

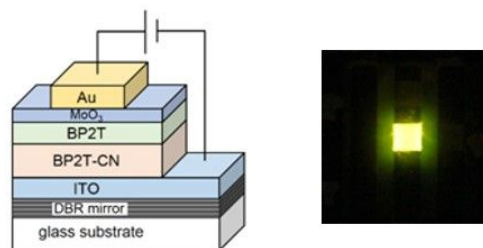


Fig. 3 BP2T (p 型)とBP2T-CN (n 型)の蒸着膜を積層した VCSEL の模式図(a)とその電界発光像(b) .

続いて、電流励起発光における励起子ポラリトンの関与を調べるため、Fig. 3 に示したマイクロキャビティ型の OLED 構造をもつ VCSEL の評価を行った。素子は活性層/電子輸送層に BP2T-CN (150 nm) を、正孔輸送層に BP2T (90 nm) を、正孔注入層に酸化モリブデン (5 nm) を真空蒸着により積層し、それらを金陽極 (35 nm) と ITO コートした DBR ミラー ($R > 99.5\%$) で挟み込んだ構造である。Fig. 5(a) に示すように、この素子の角度分解 EL スペクトルには上部金電極表面の法線方向の角度の増加に伴い高エネルギー側にシフトする 2 つの狭帯化した発光ピーク (図中 E_{ex0-0} で表示、低エネルギー側に見られるピークは DBR のストップバンドによるもの) の分散が観測された。これらの発光ピークは活性層である BP2T-CN 蒸着膜の励起子帯 ($E = 2.43$ eV) の両端に位置していることから、上枝ポラリトン (LPB) および下枝ポラリトン (UPB) に対応すると考えられ、EL 素子においても励起子ポラリトンが生成していることが確かめられた。また、現象論的ハミルトニアンを用いた解析によりフィッティングした LPB の分散プロットを Fig. 5(b) に示す。この解析から、光子と励起子の相互作用によるラビ分裂エネルギーは 235 meV と見積もられた。また、マイクロキャビティ素子の活性層の膜厚を増加させると、ピーク位置が長波長側にシフトしたことから、作製した素子が共振器マイクロキャビティとして機能していることが確認された。

Fig. 5(c) に、マイクロキャビティ構造をもつ素子と ITO 電極に DBR ミラーをスパッタリングせずマイクロキャビティ構造をもたない素子について、EL ピーク強度の電流密度依存性を比較して示した。マイクロキャビティ構造をもたない素子では、Fig. 5(a) のように狭帯化したピークのシフトは見られず、PL スペクトルと同様のブロードな発光帯で角度依存性を示さなかった。現状では、電流注入の励起密度を増加させると、どちらの素子においても発光強度の roll-off が起こり、発光増幅には至っていないが、 ~ 300 mA/cm² までの電流密度に対して超線形的に発光強度が増加していることが見て取れる。この理由の一つとして、電流注入された三重項励起子間の triplet-triplet annihilation (TTA) により生成した一重項励起子からの発光が寄与している可能性が考えられる。さらに、両素子と比べると、マイクロキャビティ構造をもつ素子の方が電流密度に対する発光強度の上昇が大きくなっていることがわかる。この超線形的な発光強度の上昇には、TTA に加えて励起子ポラリトンからの発光が寄与していると考えられる。本来、励起子ポラリトンは許容遷移する一重項励起子と光子との結合によって生成するが、三重項励起子がポラリトン発光に寄与していると、励起子間に何らかの相互作用が働き、励起子が非局在化していることが示唆される。

そこで、TPCO における励起子ポラリトンの関与をより明らかにするため、BP3T 低次元単結晶を用いて、発光スペクトルの励起密度依存性と時間分解特性を評価した。作製した BP3T 結晶は Fig. 6a の蛍光顕微鏡像に示すように薄板状に成長しており、その結晶エッジのみから発光が放射していることから、平行な端面をもつ良質な F-P 共振器として機能する。Fig. 6b に Nd:YAG パルスレーザーを用いてレーザー発振閾値前後のエネルギー密度で励起した時の発光スペクトルを示す。励起密度の上昇に伴って、2.16、2.00 eV の 0-1 および 0-2 振電遷移帯の発光が狭線化増幅した。それぞれ 432、240 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ の励起密度閾値以上でレーザー発振が得られ、0-2 帯発光の方が発振閾値が低くなった。また、発振閾値以上での両者のスペクトルを比較すると、0-2 帯発光ではピーク分裂が生じており、Fig. 6c に示した高分解スペクトルから、その

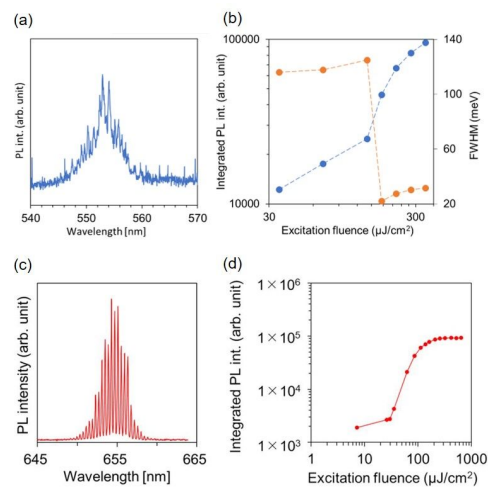


Fig. 4 TPCO 低次元結晶のレーザー発振スペクトルとその励起密度依存性。 (a,b) BP2T-CN ナノワイヤ、(c,d) BP3T 薄板状結晶。

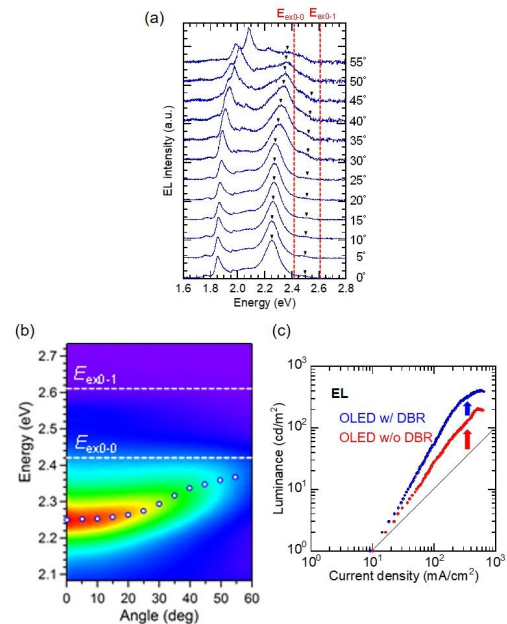


Fig. 5 TPCO 蒸着膜を積層した p/n 接合マイクロキャビティ素子の EL 特性。 (a) EL スペクトルの角度分散特性と (b) そのカラーマップ。 (c) EL ピーク強度の電流密度依存性

異常分裂の様相が見取れる。さらに、0-1 および 0-2 発光帯の時間分解発光スペクトルを測定したところ、0-1 帯では通常のフォトンレーズングで見られる励起時間原点から急峻な減衰が見られたのに対して、0-2 帯ではレーザー発振閾値前後で 60-80 ps の時間遅延が観測された。このような発光ピークの異常分裂と時間遅延を伴った特異的な発光挙動は、通常の励起子ポラリトン発光では説明できず、さらなる別の要因が関与していると思われる。

そこで、異常分裂したレーザー発振スペクトルにおいて、スペクトルの縦モード間隔の値を用いて F-P 共振方向の波数(k)を算出し、それらのエネルギー(E)分散プロット(E - k 分散プロット)を作成することにより励起子ポラリトン挙動を詳細に解析した。Fig. 6c に示した高分解スペクトルを用いて E - k プロットした結果を Fig. 6d に示す。得られた E - k プロットは、キャビティフォトン (E_{ph}) と 0-0 励起子 (E_{ex}) 間の強結合による励起子ポラリトンのエネルギー分散から大きく外れて散乱している。この異常分散した E - k プロットを解釈するため、分子振動とカップルした 3 つの励起子 ($E_{ex-2\nu_1}$, $E_{ex-(\nu_1+\nu_2)}$, $E_{ex-2\nu_2}$) を加味した右記の 5x5 現象論的ハミルトニアンを用いて解析した。ここで、 ν_1 と ν_2 は BP3T 分子の骨格伸縮振動 ($\nu_1=1458\text{ cm}^{-1}$, $\nu_2=1600\text{ cm}^{-1}$) で、0-2 帯の振動であるのでそれらの二次の振動エネルギーを E_{ex} から減じている。

BP3T 結晶の下肢吸収スペクトルと蛍光スペクトルから求めた 0-0 励起子エネルギー $E_{ex} = 2.351\text{ eV}$ を用いてフィッティングを行った。その結果、Fig. 6d に示すように、0-2 発光帯において $E_{ex-2\nu_1}$, $E_{ex-(\nu_1+\nu_2)}$, $E_{ex-2\nu_2}$ を挟んで分裂した分散曲線を用いて近似することができ、それぞれの Rabi 分裂エネルギーは、 $\hbar\Omega=1.70$, $\hbar\omega_{2\nu_1}=4$, $\hbar\omega_{2\nu_2}=10$, $\hbar\omega_{(\nu_1+\nu_2)}=10\text{ eV}$ と見積もられた。このような振動が結合した励起子が関与した励起子ポラリトンを Vibrationally dressed exciton polariton (VDEP) と呼び、理論的には報告されているが、実験的に確かめられたのは初めてである。

以上、本研究で得られた結果から TPCO 低次元単結晶キャビティに見られる特異なレーザー作用について、その発光増幅過程を Fig. 7 にまとめ、以下に考察する。まず、TPCO 結晶キャビティを Nd:YAG パルスレーザー ($\lambda=355\text{ nm}$) あるいは Ti:S フェムト秒パルスレーザー ($\lambda=397\text{ nm}$) を非共鳴エネルギーで励起すると、高い振動準位に励起された電子は一重項励起子状態 (S_1) に振動緩和して exciton reservoir を形成する。通常、この緩和は個々の分子内で起こり、その時間は $< 1\text{ ps}$ 以内と高速である。この S_1 励起子から誘導放射によって増幅して発振するのが通常の photon lasing である。また、共振器キャビティ中でこの励起子とフォトンが結合して分子振動によるフォノンを掃き出しながら形成されるのが通常の励起子ポラリトンで、図中ではこの過程を stimulated cooling/LPB と表わしている。

一方、スペクトルの異常分裂や時間遅延が観測された TPCO 結晶の特異な発光過程は以下のように推察される。鎖状分子が高度に一軸配列した TPCO 結晶中では、ある一定の励起子密度領域において分子間相互作用により振動緩和にコヒーレンスが生じ、マクロスコピックに相関した 0-0 励起子が exciton reservoir に形成される。このコヒーレントな振動相互作用に要する時間がレーザー発振閾値前後での時間遅延として表れていると考えられる。一旦、このような集団励起子が形成されると、振動のコヒーレンスを保ったまま基底状態の振動準位に遷移してレーザー発振する。図中ではこの過程を cooperative cooling/VDEP と表わしており、複数の振動準位がカップルすることにより、レーザー発振スペクトルに異常分裂が生じると解釈できる。

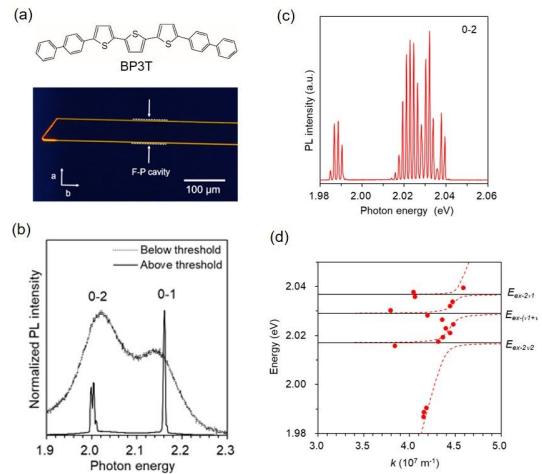


Fig. 6 BP3T 単結晶の蛍光顕微鏡像(a)とレーザー発振閾値前後の PL スペクトル(b) . 0-2 発光帯におけるレーザー発振スペクトル(c) とその E-k プロット(d) .

$$\begin{pmatrix} E_{ph} & \hbar\Omega/2 & \hbar\omega_{2\nu_1}/2 & \hbar\omega_{(\nu_1+\nu_2)}/2 & \hbar\omega_{2\nu_2}/2 \\ \hbar\Omega/2 & E_{ex} & 0 & 0 & 0 \\ \hbar\omega_{2\nu_1}/2 & 0 & E_{ex-2\nu_1} & 0 & 0 \\ \hbar\omega_{(\nu_1+\nu_2)}/2 & 0 & 0 & E_{ex-(\nu_1+\nu_2)} & 0 \\ \hbar\omega_{2\nu_2}/2 & 0 & 0 & 0 & E_{ex-2\nu_2} \end{pmatrix}$$

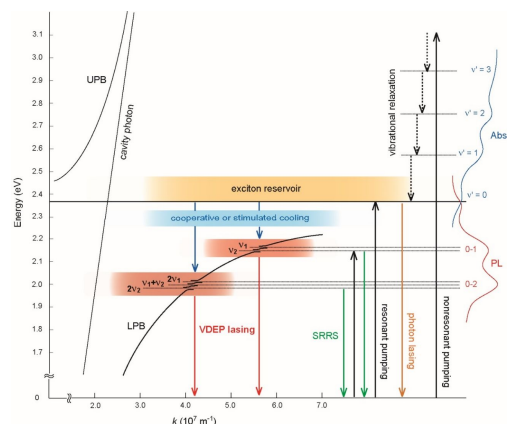


Fig.7 TPCO 低次元結晶が示すレーザー作用および協同的発光増幅過程のまとめ .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Matsuo Takumi, Roessiger Carina, Herr Jasmin, Goettlich Richard, Schlettwein Derck, Mizuno Hitoshi, Sasaki Fumio, Yanagi Hisao	4. 巻 10
2. 論文標題 Synthesis and characterization of methoxy- or cyano-substituted thiophene/phenylene co-oligomers for lasing application	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 24057 ~ 24062
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0ra04742b	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 Mizuno Hitoshi, Nishimura Takumi, Mekata Yuya, Kurahashi Naho, Odani Momonosuke, Nguyen Van-Cao, Inada Yuhi, Yamao Takeshi, Sasaki Fumio, Yanagi Hisao	4. 巻 60
2. 論文標題 Distributed feedback laser with methylammonium lead bromide embedded in channel-type waveguides	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SBBH11 ~ SBBH11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abdb7f	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 Shohei Dokiya, Hideyuki Mizuno, Hitoshi Mizuno, Hiroyuki Katsuki, Kenichi Yamashita, Fumio Sasaki, and Hisao Yanagi	4. 巻 12
2. 論文標題 Strong Exciton-photon Coupling in Organic Microcavity Electroluminescence Devices with Thiophene/Phenylene Co-oligomer Derivatives	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 111002/5 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab47b9	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 Tomoya Akazawa, Fumio Sasaki, Kazuki Bando, Hitoshi Mizuno, Hiroyuki Katsuki, and Hisao Yanagi	4. 巻 59
2. 論文標題 Fabrication of low-dimensional microstructures with distyrylbenzene derivatives	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDA07/5 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab4eca	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 Takumi Matsuo, Hitoshi Mizuno, Fumio Sasaki and Hisao Yanagi	4. 巻 59
2. 論文標題 Indication of cooperative light amplification process in 5,5" bis(biphenyl) 2,2':5',2" terthiophene single crystals at room temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDB02/4 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab5412	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 Pananus Potisat, Shohei Dokiya, Hitoshi Mizuno, Fumio Sasaki, and Hisao Yanagi	4. 巻 59
2. 論文標題 Fabrication by Vaporized Film Deposition and In-situ FET Measurements of Polycrystalline Thiophene/Phenylene Co-Oligomer Films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDA17/4 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab53c9	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 T. Matsuo, Y. Ueda, H. Mizuno, F. Sasaki, K. Yamashita and H. Yanagi	4. 巻 9
2. 論文標題 Optically pumped lasing based on vibrationally dressed exciton polaritons in a single-crystal molecular cavity at room temperature	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 2015-2023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.2c00123	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 T. Matsuo, F. Sasaki and H. Yanagi	4. 巻 15
2. 論文標題 Optically pumped lasing in a single crystal cavity of thiophene/phenylene co-oligomers grown via improved crystal growth methods in solution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Express	6. 最初と最後の頁 51002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac5e63	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 -

〔学会発表〕 計33件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Takumi Matsuo, Fumio Sasaki and Hisao Yanagi
2. 発表標題 Optically pumped lasing from solution-grown single crystals of 5,5'-bis(4-biphenyl)-2,2':5',2''-quaterthiophene
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木史雄, 松尾 匠, 高田徳幸, 棕橋奈穂, 水野斎, 柳 久雄
2. 発表標題 ペロブスカイト電荷移動層と(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー発光層からなる有機EL素子の開発
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 水野 斎, 甚上 知美, 阪東 一毅, 佐々木史雄, 柳 久雄
2. 発表標題 ブチル基置換(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーの結晶多形形成による光学特性の変化
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 松尾 匠, 佐々木史雄, 柳 久雄
2. 発表標題 BP4T単結晶からの遅延時間を伴った光励起レーザー発振
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 佐々木 史雄, 松尾 匠, 高田 徳幸, 椋橋 奈穂, 水野 斎, 柳 久雄
2. 発表標題 溶液キャスト法による微小共振器形成とその有機EL素子開発
3. 学会等名 レーザー学会第560回研究会「有機コヒーレントフォトンクス」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾 匠, 佐々木史雄, 柳 久雄
2. 発表標題 溶液成長法によるチオフェン/フェニレンコオリゴマー単結晶の作製とそのレーザ特性
3. 学会等名 SATテクノロジー・ショーケース2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木 史雄, 松尾 匠, 高田 徳幸, 椋橋 奈穂, 水野 斎, 柳 久雄
2. 発表標題 溶液キャスト法による有機半導体結晶微小共振器からのEL発光
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 菅原拓実, 水野 斎, 甚上知美, 佐々木史雄, 柳 久雄
2. 発表標題 ヘキシル基置換(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーの単結晶の作製とその光学特性
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 門司悠佑, 水野 斎, 甚上知美, 山下兼一, 佐々木史雄, 柳 久雄
2. 発表標題 シアノ基置換(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー単結晶マイクロキャピティの作製とその光学特性
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 甚上 知美, 水野 斎, 佐々木史雄, 柳 久雄
2. 発表標題 シアノ基置換(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーの結晶多形の光学特性
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 松尾 匠, 水野 斎, 佐々木史雄, 柳 久雄
2. 発表標題 BP3T結晶からの光励起レーザー発振における励起子ポラリトンの関与
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

1. 発表者名 棕橋 奈穂, 水野 斎, 佐々木 史雄, 柳 久雄
2. 発表標題 マイクロリング構造を有するCH ₃ NH ₃ PbBr ₃ /PEO複合体LECの作製
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

1. 発表者名 目片優也, 水野嵩, 阪東一毅, 佐々木史雄, 柳久雄
2. 発表標題 ヘキシル置換チオフェン/フェニレンコオリゴマーナノ結晶の作製およびその光学特性
3. 学会等名 分子科学会オンライン討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hitoshi Mizuno, Takumi Nishimura, Yuya Mekata, Naho Kurahashi, Van-Cao Nguyen, Yuhi Inada, Takeshi Yamao, Fumio Sasaki, and Hisao Yanagi
2. 発表標題 Distributed Feedback Laser with Methyl Ammonium Lead Bromide Embedded in Chanel-Type Waveguides
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Device and Materialss (SSDM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳久雄、水野 斉、松尾 匠、佐々木史雄、阪東一毅、山下兼一
2. 発表標題 TPCO低次元結晶の協同的発光増幅現象
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木史雄、柳久雄
2. 発表標題 TPCO系及びペロブスカイト系有機半導体レーザー材料のデバイス開発：高効率レーザー照明に向けて
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoya Akazawa, Fumio Sasaki, Kazuki Bando, and Hisao Yanagi
2. 発表標題 Fabrication of Low-dimensional Microstructures with Distyrylbenzene Derivatives
3. 学会等名 10th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Matsuo, Fumio Sasaki, and Hisao Yanagi
2. 発表標題 Amplified light emission based on cooperative process in single crystals of thiophene/phenylene co-oligomer
3. 学会等名 10th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Pananus Potisat, Shohei Dokiya, Fumio Sasaki, and Hisao Yanagi
2. 発表標題 Fabrication by Vaporized Film Deposition and In-situ FET Measurements of Polycrystalline Thiophene/Phenylene Co-Oligomer Films
3. 学会等名 10th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Mizuno, Tomomi Jinjyo, Ichiro Hiromitsu, and Hisao Yanagi
2. 発表標題 Fabrication and Characterization of Microcavities Containing Submicron Particle Films of 5,5'-Di(4-biphenyl)-2,2'-bithiophene
3. 学会等名 10th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Mizuno, Fumio Sasaki and Hisao Yanagi
2. 発表標題 Self-Waveguided Gain Narrowing of Light Emission from Single Crystals of Hexyl-Substituted Thiophene/Phenylene Co-Oligomer
3. 学会等名 2019 International Conference on Solid State Device and Materialss (SSDM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Pananus Potisat, Shohei Dokiya, Fumio Sasaki and Hisao Yanagi
2. 発表標題 Ambipolar field-effect transistor with polycrystalline BP3T film prepared by vapor film deposition method
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 水野 斎, 吉田 航, 豊田健人, 香月浩之, 佐々木史雄, 山下兼一, 柳 久雄
2. 発表標題 (チオフェン/フェニレン) コオリゴマー薄膜を有するマイクロキャピティの作製とその光学特性
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 甚上 知美, 水野 斎, 廣光 一郎, 佐々木史雄, 柳久雄
2. 発表標題 BP2Tナノ粒子の作製とその光学特性
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 目片優也, 水野 斎, 佐々木史雄, 柳久雄
2. 発表標題 ヘキシル置換(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーナノ粒子の光学特性
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 松尾 匠, 水野 斎, 佐々木史雄, 柳久雄
2. 発表標題 溶液成長法によって作製したBP3T単結晶からの光励起レーザー発振
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 豊田健人, 松尾匠, 水野 斎, 阪東一毅, 佐々木史雄, 柳久雄
2. 発表標題 BP3Tナノワイヤ結晶の作製と発光特性の評価
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 松尾 匠, Carina Roessiger, Jasmin Herr, Richard Goettlich, Derck Schlettwein, 水野 斎, 佐々木史雄, 柳久雄
2. 発表標題 メトキシ基とシアノ基で両末端置換したThiophene phenylene co-oligomerの合成とキャラクタリゼーション
3. 学会等名 第28回有機結晶シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松尾 匠, 水野 齋, 佐々木史雄, 柳久雄
2. 発表標題 BP3T 単結晶における光励起レーザ発振および狭線化増幅特性
3. 学会等名 レーザー学会第540回研究会「有機コヒーレントフォトンクス」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水野 齋, 吉田 航, 香月 浩之, 佐々木 史雄, 山下 兼一, 柳 久雄
2. 発表標題 (チオフェン/フェニレン) コオリゴマー低次元単結晶及びマイクロキャビティの作製とそれらの光学特性
3. 学会等名 レーザー学会第540回研究会「有機コヒーレントフォトンクス」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松尾匠, 上田悠介, 水野齋, 佐々木史雄, 山下兼一, 柳久雄
2. 発表標題 有機単結晶共振器における分子振動をまとった励起子ポラリトン形成に由来する光励起レーザ発振
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 佐々木 史雄, 松尾匠, 高田徳幸, 棕橋 奈穂, 水野齋, 柳久雄
2. 発表標題 溶液キャスト法による有機半導体微小結晶共振器の pn 接合と EL 発光
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 門司悠佑, 水野斎, 甚上知美, 山下兼一, 佐々木史雄, 柳久雄
2. 発表標題 シアノ基置換(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーを含有するマイクロキャピティの作製とその光学特性
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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	佐々木 史雄 (Sasaki Fumio) (90222009)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・上級主任研究員 (82626)	
研究分担者	山下 兼一 (Yamashita Kenichi) (00346115)	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授 (14303)	
研究分担者	阪東 一毅 (Bando Kazuki) (50344867)	静岡大学・理学部・准教授 (13801)	
研究分担者	山雄 健史 (Yamao Takeshi) (10397606)	京都工芸繊維大学・材料化学系・教授 (14303)	

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
---------	---------