

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05632

研究課題名(和文) プラズモニックウィスパリングギャラリーモードを利用した有機材料の量子状態制御

研究課題名(英文) Control of electronic states of organic materials using plasmonic WGM

研究代表者

小簀 剛 (Komino, Takeshi)

兵庫県立大学・理学研究科・准教授

研究者番号：20547301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：以下の成果が得られた。(1) WGM共振器に用いる薄膜材料の特性評価プロトコルの作成、(2) 表面プラズモンのWGMと結合した励起子ポラリトンからの発光スペクトルの先鋭化およびその波長制御、(3) 光WGM共振器における先鋭化波長制御、(4) 光物理現象への応用1：エネルギー移動、(5) 光物理現象への応用2：一重項分裂。特に(2)について、金属のWGM共振器が表面プラズモンの伝搬長と同程度である場合、WGM共振器の共鳴波長において自然放射増幅光に基づくスペクトルの先鋭化は起こらない一方で、伝搬長を延伸する工夫を講じることで先鋭化を実現できる可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この成果は表面プラズモンが関与するマイクロ共振器を利用することにより有機材料の励起状態制御が可能であることを示すものである。また、この成果に立脚して、光・電子デバイスの発光波長や発光効率といった基本的な特性の向上に繋がる技術の開発が期待される。

研究成果の概要(英文)：The project clarified the followings: (1) development of an evaluation protocol for photoluminescence in organic WGM resonators. (2) spectral narrowing of photoluminescence from quasiparticles generated by combining exciton polariton and surface plasmon. (3) control of spectral narrowing wavelength in photonic WGM. (4) application of the WGM structure to photophysical phenomenon 1: energy transfer. (5) application of the WGM structure to photophysical phenomenon 2: singlet fission.

Especially in the subject (2), we revealed that presence of amplified spontaneous emission from the quasiparticles is closely related to the propagation length of surface plasmons.

研究分野：ナノフォトニクス プラズモニクス

キーワード：表面プラズモン 量子状態制御 MEMS 分散関係計測 波動光学シミュレーション WGM モード結合

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

有機材料は分子構造と凝集構造に柔軟性をもつため、その量子状態には多様性がある。したがって、有機材料における量子状態の制御は、多様な量子状態の中から実験者が所望する量子状態を選択的に生成する上で有用な手段となる。たとえば、発光スペクトルを先鋭化し、その波長を自在に制御できる技術が開発されれば、それは有機薄膜において精度の高い量子状態の制御法となる。さらに、当該の制御法が光だけでなく電子にも関係した方法であれば、将来的に多様な制御法の開発が期待されるのと同時に、容易に光・電子デバイスへの応用に展開することができる。

2. 研究の目的

有機薄膜からの発光の先鋭化は共振器構造を用いれば実現できる。本研究の独自性は、この構造に表面プラズモンの効果を付与することにある。ここで用いる表面プラズモンを誘起する材料は、局在型のナノ材料ではなく伝搬型のバルク材料である。したがって、発光の共鳴を誘起する共振器としてのみならず、将来的に電極としての利用も期待できる。このことを指向して、金属からなる円の表面をプラズモンが周回するプラズモニック・ウィスパーリングギャラリモード (WGM) と励起子ポラリトンを結合して、以下二つの原理検証を行った。

プラズモニック WGM の表面プラズモンが先鋭化された発光スペクトルを呈すること。

WGM の共振器の二次元パターンから先鋭化する波長を制御できること。

3. 研究の方法

シリカのマイクロディスクまたはマイクロビーズの上に金属およびレーザー分子を堆積させる。ディスクまたは球を 2 次元的に配列することにより、レーザー分子からの発光波長を制御する。ここで、レーザー分子からの発光は WGM の共鳴波長で先鋭化することを想定している。特に、金属の伝搬型表面プラズモンの WGM の共鳴波長で先鋭化させる構造を探索する。

シリカのマイクロ構造はビーズよりもディスク構造の方が MEMS 技術を利用して作製しやすい。このため、正方形の単位胞を有するシリカのマイクロディスクアレイを試料構造に用いることとした。金属の種類は Al、Ag、Au の 3 種を用いた。レーザー分子は青から緑色までの発光波長を有するレーザー分子を利用した。詳細は研究成果を参照されたい。

MEMS を利用した構造は本研究の目的に照らして必須である一方で、材料の基本的な特性を調べるためにはスループットを下げる方法である。そこで、市販のシリカマイクロビーズをガラス基板に撒布し、その上から金属および有機薄膜を成膜することでお椀型の WGM 共振器も作製した。この共振器を利用することで、効率よく材料の比較や先鋭化のしやすさを調べることができる。

4. 研究成果

(1) WGM 共振器に用いる薄膜材料の特性評価プロトコルの作成

本研究ではマイクロ共振器を 2 次元的にアレイ化することにより、アレイ特有の光学モードを生成することを想定している。他方、共振器に用いる材料の基本的な光物理および光学的性質 (発光スペクトルの形状や先鋭化のしやすさ等) は、アレイを用いずとも、スループットの高い方法で確認できればよい。そこで、評価系の構築と共に、容易に試料を作製できる方法を検討した。

本研究を通して使用する装置として、蛍光顕微分光系と光学分散関係の計測系を作製した。両方の測定系はともに同一の励起光源である 355 nm の Nd:YAG パルスレーザー (5 ns) を用い、ND フィルターにより光強度を調整する仕様とした。この装置を利用することにより、主として、発光スペクトルの励起光強度依存性、入出力特性、反射光・透過光・発光の角度分解測定およびそれらの励起光強度依存性を自動で取得することができる。

高いスループットで材料の基本的な特性を評価するために、数～数 10 μm の直径をもつシリカマイクロビーズ上に有機薄膜を数 10～数 100 nm の厚さで真空蒸着した試料構造をテンプレートとして用いた。有機薄膜はマイクロビーズの湾曲した表面上に堆積するため、お椀型に成形される。このお椀の外縁部近傍に WGM を誘起することができれば、各材料間で発光スペクトルとその先鋭化のしやすさを評価することができる。この観点から、まず、基準となる材料を選定した。選定した材料は、低い自然放射増幅光閾値をもつ (すなわち、スペクトルの先鋭化が起こりやすい) スチルベン系レーザー分子の BSB-Cz である。BSB-Cz のお椀型薄膜 (膜厚 250 nm、直径 20 μm) の発光スペクトルおよび入出力特性の測定を行った結果、480 nm 付近に WGM に特有の櫛型の発光スペクトルを得ることができた。波動光学シミュレーションから、得られた発光スペクトルのピーク波長は WGM の共鳴波長に同じであることを確認した。また、入出力特性から、このスペクトルは 4 $\mu\text{J mm}^{-2}$ の入射光強度以上で得られることを見出した。これは、この閾値強度以上で自然放射増幅によりスペクトルが先鋭化することを示唆する。さらに、先鋭化したスペクトルの半値幅から、この WGM 共振器の Q 値が 1000 程度であることを明らかにした。

以上の結果から、上記の装置を利用して本研究にかかる種々の測定を行うことができることの確認と同時に、標準試料として利用可能な材料および試料形状を決定することができた。

(2) 表面プラズモンの WGM と結合した励起子ポラリトンからの発光スペクトルの先鋭化およびその波長制御

本研究の目的は、表面プラズモンと結合した励起子ポラリトンからの発光の先鋭化とその波長制御である。そこで、(1) で作製した装置および試料のテンプレートをを用いて金属を含む WGM 共振器を作製した。作製した試料は 20 μm -シリカビーズの上に、金属 (50 nm)/CBP(20 - 600 nm)/レーザー分子 (250 nm)を堆積したお椀型の WGM 共振器である。ここで、CBP はレーザー分子から金属へのフェルスター移動に伴う消光を抑制するためのスペーサーである。金属は Al、Ag、Au の 3 種類を検討した。また、レーザー分子は BSB-Cz に加え、BSB-Cz よりも短波長の 430 nm に強い発光ピークをもつフルオレン系レーザー分子である TDAF を用いた。

励起光強度を正の方向に掃引しつつ発光スペクトルを測定したところ、自然放射増幅光によるスペクトルの先鋭化を見出した。しかしながら、WGM に特徴的な櫛型のスペクトルを得るには至らなかった。この先鋭化は、WGM 共振器内で起こっているものの、WGM 以外の光学モード (たとえば、局所的な導波モード) に起因した現象であることが考えられる。櫛型のピークが得られずとも、スペクトルの先鋭化が起こることは研究開始以前に予想していた結果である。また、シリカビーズの支持基板法線の周りの角度に対して先鋭化ピークが変化することを見出した。この結果から、発光スペクトルの先鋭化およびピーク波長の制御性の実証を指向した当初案を最低限度で達成することができた。

当初見込んでいた櫛型のスペクトルを得ることができなかったことについて、以下のことを調べ、新たな知見を見出した。

(2)- レーザー分子の励起子は表面プラズモンと結合している

通常のフェルスター半径が高々 20 nm であることを考慮すると、スペーサー層の膜厚を 600 nm にした場合、もはやレーザー分子から金属材料へのフェルスター移動は起こり得ない。しかし、CBP の膜厚が 600 nm である場合においても、(1) に示した基準構造ではほぼ 100% の歩留まりで観測できるはずの自然放射増幅光を見出すことができなかった。このことは、レーザー分子の励起子と表面プラズモンが結合して消光していることを示唆する。実際に、スペーサーの膜厚を 20 nm から 600 nm に厚くしていくと、櫛型ではないスペクトルの先鋭化が起こる励起光強度の閾値が低下する。

(2)- 表面プラズモンによる消光と自然放射増幅光は拮抗している

入出力特性を確認しても、金属の種類と膜厚およびレーザー分子の種類によらず、スペクトルの先鋭化に伴う急激な発光強度の増大は見られなかった。この結果は、一見するとピーク強度以外の波長において選択的な消光が起こることを示しているようである。しかし、シミュレーションを用いても、ピーク波長がカットオフ波長であることを示唆する結果が得られないことから、カットオフモード由来の現象である可能性は小さい。考えられる合理的な解釈は、表面プラズモンによる消光と自然放射増幅光による発光の増幅が拮抗していることである。すなわち、励起光強度の増大に伴い、励起子密度は増大するが、生成された励起子は表面プラズモンと結合して消光する。このような状況下においても誘導放出断面積の大きな波長において誘導放出は起こるため、スペクトルの先鋭化が起こり得る。ただし、先鋭化されたスペクトルに櫛型構造が現れないことから、この自然放射増幅光は共振器の赤道方向を周回するモードからの発光ではなく、共振器内の別の位置において起こる局所的な光の増幅の結果起こる発光であると考えられる。

(2)- WGM の共鳴波長で先鋭化された発光スペクトルが得られない原因はプラズマ周波数ではない

プラズマ周波数に対応する波長は、平滑な金属膜を仮定して Ag および Au でそれぞれ 430 nm および 530 nm 程度である。したがって、それらよりも長い波長領域に強い発光ピークをもつ BSB-Cz (480 nm) と TDAF (430 nm) では単純な光 WGM による自然放射の増幅が起こったとしても不思議ではない。しかし、これらの材料においても 600 nm 付近まで発光スペクトルが裾を引いており、結果として表面プラズモンによる消光は起こる。他方、Al のプラズマ周波数に対応する波長は 300 nm 以下である。したがって、表面プラズモンによる消光が起こる一方で、表面プラズモンの WGM と励起子ポラリトンの WGM の結合も起こり得る。しかしながら、(2)-1 の通り、Al を用いても櫛型の発光スペクトルは得られなかった。このことから、WGM の共鳴波長で先鋭化された発光スペクトルが得られない原因はプラズマ周波数と発光波長帯の不一致ではないと結論する。

(2)- 櫛型のスペクトルが得られない主因はプラズモンの伝搬長である

光学分散から表面プラズモンの伝搬長を計算すると、各金属材料とも伝搬長は 10 μm に満たない。研究開始当初、伝搬長が短い場合においても利得媒質を用いることで伝搬長を延伸することができると考えていた。実際に、近年の関連分野の報告から、このことは正しい。しかし、延伸できる伝搬長は用いた WGM 共振器の周囲の長さと同程度であり、発光の増幅効果が抑制されることが分かった。

(2)- 光 WGM とプラズモン WGM のハイブリッドモードに見込みがある

プラズモンの伝搬長は短いですが、検討した WGM 共振器のサイズにおいても、WGM 由来の発光の先鋭化が起こる可能性がある。波動光学シミュレーションを用いて計算を行うと、光 WGM とプラズモンの WGM のハイブリッドモードが共振器を周回する可能性を見出している。現在までに、WGM 共振器構造に工夫を講じることで伝搬長の問題を解決できる知見を得ており、今後の展望とし

て、このことに関する研究の水平展開を見込んでいる。

(3) 光 WGM 共振器における先鋭化波長制御

表面プラズモンの WGM に由来する先鋭化波長制御は、その前提である表面プラズモンの WGM を発光として試料系外に取り出さなければならないが、(2) に示した理由で現時点ではそれが不可能である。そこで、表面プラズモンの WGM アレイにも応用できる方法を用いて、先鋭化波長の制御は可能であることを示すことにした。

用いた試料構造は、(1) に示した BSB-Cz 薄膜を基調とした構造である。ただし、成膜はマイクロピーズ上ではなく、MEMS を用いて作製した SiO₂ のマイクロディスクのアレイ上に行った。BSB-Cz の膜厚は 250 nm とした。SiO₂ のマイクロディスクのアレイは、高さが 600 nm であり、1 辺が 4~16 μm の正方形の単位胞を有している。この試料の発光特性を (1) に示した方法で確認したところ、WGM に由来する櫛型のピークが得られた。

発光特性について、単位胞の 1 辺の長さから試料を 2 種類のグループに分けられる。一つ目のグループ (第 1 グループ) は、1 辺の長さが 8 μm よりも長いグループである。このグループにおける発光スペクトルは、現れるピークの波長間隔から、孤立したディスク 1 つからの共鳴モードを反映していることが分かった。二つ目のグループ (第 2 グループ) は、1 辺の長さが 8 μm 以下のグループである。このグループでは、隣接するディスク間でモードが結合することが分かった。実際に、第 1 グループの Q 値が 400 程度であるのに対して、第 2 グループの Q 値は 1000 程度と大きい。これは、第 2 グループにおいて、ディスクから漏れ出した発光が隣接するディスクに流れ込むことでモードの散逸が抑制されることに起因する。また、入出力特性を見ると、第 1 グループの方が第 2 グループよりも内部ゲインが大きいことが分かった。内部ゲインは近似的に励起子密度と線形の関係にある。したがって、光学モードを複数の共振器間で共有する第 2 グループでは、第 1 グループに対して励起子密度が低いと解釈できる。いずれにしても、実験的な発光スペクトルと入出力特性の結果から第 2 グループにおいてモードの結合が起こることを示唆する結果を得た。そこで、光学シミュレーションからこの現象を再現することを試みた。試料を模した構造を波動光学解析ソフトウェア上に作成し、発光の先鋭化が起こる波長帯で固有モードの探索を行ったところ、第 2 グループの構造において隣接するディスク間でモードの結合が起こることを見出した。モード結合は、ディスクのない (つまり、隣接する 2 つのディスクの間の領域の) 有機薄膜内でおこる多重反射が、隣接する共振モードを架橋することで起こることが分かった。このことは、通常、WGM 共振器間のモード結合において利用されるエバネッセント光を利用する方法よりも 2 桁長い距離でモード結合が実現できることを示唆する。8 μm のスペースは電子線リソグラフィやドライエッチングプロセスを利用せずとも、フォトリソグラフィとウェットエッチング技術で作製できる意味で簡単に作製が可能な構造である。以上の結果から、簡単な方法で WGM のモード制御を実現できることを明らかにした。

この技術を利用することにより、さらに複雑な構造を用いることで、どの程度の波長制御が実現できるかを調べる研究に発展する可能性がある。薄膜導波モードは共振器の一次構造および高次構造に敏感であるはずであり、したがって、これらの構造を制御することでモード結合の強弱を容易に制御できる。また、このことを波動光学計算から予測することができるため、効率的な光学設計により研究の展開の加速が期待できる。

(4) 光物理現象への応用 1 : エネルギー移動

表面プラズモンの WGM を見出すための実験には研究期間の大部分を充て、(2) に示した結論 (伝搬長の延伸の工夫を講じることで WGM による発光スペクトルの先鋭化は可能であること) を得た。他方、仮に、伝搬型表面プラズモンが WGM に利用できない結論を見た場合においても、当初計画に関連する知見を得るために、研究の方向性を当初計画から以下のように拡張した。本研究で得られた知見は将来的に光・電子デバイスに展開することを想定している。この観点において、WGM を光物理現象の発見や制御に用いることを見込んだ実験を行った。

本研究課題で用いる共振器の有機薄膜を 2 成分系で作製した場合、発光波長範囲を拡張できることから、波長の制御性に繋がる。また、関連分野の既往の研究から、光 WGM 共振器はエネルギー移動効率を加速することに利用できることが分かっている。そこで、エネルギードナーとエネルギーアクセプターにそれぞれレーザー分子を用いて、エネルギー移動を利用した光 WGM の発光波長制御を試みた。

用いたレーザー分子はエネルギードナーである BSB-Cz とエネルギーアクセプターであるクマリン系分子の C545T である。励起波長の 355 nm において、C545T の吸収は極めて微弱である。したがって、C545T の発光はほぼすべて BSB-Cz からのエネルギー移動を起源として起こる。まず、WGM 共振器を用いずに BSB-Cz/C545T (t1)/BSB-Cz(t2) の構造を作製した。総膜厚は 250 nm に固定し、C545T 層の膜厚 t1 を 10 nm、共振器の外殻を成す BSB-Cz 層の膜厚 t2 を 120 nm に設定した。この試料では C545T からの発光は BSB-Cz の発光に対して無視できる程度に小さく、BSB-Cz から C545T へのエネルギー移動は効果的に起こらない。この有機薄膜構造はそのままに、薄膜を (1) のテンプレートに従って成膜した。その結果、C545T の発光は増大し、発光色も深い青から青緑色に変化した。しかし、この構造では C545T のスペクトル先鋭化を誘起するには至らなかった。そこで、C545T の自然放射増幅光を誘起する構造の探索を行った。C545T 層の膜厚 t1 を 1 nm に薄くし、BSB-Cz 層の膜厚 t2 を薄くすることによって、C545T からの発光が増大し、t2 が 35 nm の構造で最大となった。この構造の調整に伴って、C545T のスペクトルは先鋭化しやすくなり、t2 が 35 nm の構造では WGM による明らかな櫛型のスペクトルが得られた。

各構造でエネルギー移動の効率がどのように異なるかについて調べるために、BSB-Cz と C545T の励起子密度に関するレート方程式を立てた。ここで、BSB-Cz から C545T へのエネルギー移動はフェルスター移動と放射によって起こることを想定している。BSB-Cz と C545T の発光強度比は実験的に得られるため、この強度比を再現するように、レート方程式のパラメータを選ぶことで解析を行うことができる。パラメータは、BSB-Cz と C545T の輻射レートと無輻射レート、共振器の Q 値、フェルスター半径、励起光強度が弱い場合における BSB-Cz から C545T へのエネルギー移動効率、BSB-Cz から C545T へのエネルギー移動効率のスケール因子 a である。この内、 a 以外のパラメータは実験および文献値を用いて固定値として利用することができる。したがって、解析的に値を決定することができるパラメータは a であり、 a が 1 の場合、エネルギー移動は他のパラメータにしたがって起こり、 a が 0 の場合エネルギー移動は起こらない。C545T の励起子密度が高くなるにつれて、エネルギー移動効率が鈍化することが予想されることから、励起光強度の増大に伴って、 a が小さくなることが予想される。実際に、C545T のスペクトル先鋭化が起こる全ての試料において、この傾向が見出された。すなわち、励起光強度が低い場合は C545T の発光が励起光強度の増大に対してほぼ線形であるが、C545T の発振が見られる励起光強度付近から C545T の発光強度は飽和し、代わりに BSB-Cz の発光強度が増大する。特に、上述の構造 ($t_1 = 1 \text{ nm}$ 、 $t_2 = 35 \text{ nm}$) の場合は顕著であり、他の構造において a は低くても 0.9 程度であるのに対して、この構造における a は 0.5 程度であった。 a が低い程、C545T の励起子密度は反転分布に近づき、自然放射増幅光は発現しやすくなる。したがって、この構造 ($t_1 = 1 \text{ nm}$ 、 $t_2 = 35 \text{ nm}$) で a が小さいことは、実験結果と整合する。

上の結果から、今後の研究の展開に有用な以下の知見を得ることができた。(I) WGM 共振器における利得媒質間のエネルギー移動は、スペクトルの先鋭化およびそのモード制御による波長制御においても有用である。(II) 共振器における利得媒質の積層構造を調整することにより、フェルスター移動と放射によるエネルギー移動の効率を制御し、結果的として発光スペクトルを制御することができる。

(5) 光物理現象への応用 2：一重項分裂

(4) と同じ観点で、他の光物理現象も調べた。一重項分裂は、近年、太陽電池の効率向上への有用性が指摘されている現象である。関連分野の研究から、1 つの一重項励起子から 2 つの三重項励起子を生成する際、2 つの三重項励起子が結合した中間状態を経由することが指摘されている。したがって、一重項励起子から中間状態、または、中間状態から三重項励起子の生成過程で遷移速度を向上させることができれば、一重項分裂の効率向上が期待できる。ここで、一重項励起子のポラリトンのエネルギーおよび波動ベクトルを共振器の固有モードに合わせることで、中間状態生成のレートが向上する可能性がある。実際に、このことを指向して、共振器を利用した一重項分裂の促進に関する研究が、他グループで進められている。WGM は複数の共振器モードがエネルギー的に高密度に存在するため、この促進に有用であると考えられる。そこで、一重項分裂現象を光 WGM 共振器で誘起できるかどうかを確認する実験を行った。

一重項分裂材料としてベンゾフラン誘導体である DPBF を選んだ。DPBF に限らず一重項分裂材料は結晶性を有することが多い。したがって、表面平滑性を要件とする光共振器の材料に適用することは困難であるが、非晶質材料で DPBF を被覆することにより光共振器を作製できないかと考えた。被覆用材料として用いた材料は (2) に示したレーザー分子 TDAF である。(4) の知見に基づいて、発光スペクトルと吸収スペクトルの関係から、TDAF から DPBF へのエネルギー移動は起こり得る。そこで、TDAF (120 nm)/DPBF (10 nm)/TDAF (120 nm) の構造で (1) に示したテンプレートの構造で光 WGM 共振器を作製した。発光スペクトルは、TDAF および DPBF からの発光を含み、励起光強度の増大に伴って TDAF の発光が楕型に先鋭化した。すなわち、WGM の共鳴波長において、TDAF が選択的に自然放射増幅光によるスペクトル先鋭化を示した。先鋭化が起こる励起光強度の閾値は、TDAF の単一成分薄膜を用いた場合に比して 10 倍程度に増大した。このことは、主として、TDAF から DPBF のエネルギー移動により TDAF の励起子密度が低下したことに起因すると考えられる。したがって、この閾値を調べることで、TDAF から DPBF へのエネルギー移動効率を調査することができる。光共振器を大気曝露した場合と窒素雰囲気中で封止した場合を比べた場合、窒素雰囲気中で封止した試料の方が大気曝露した試料に比べて励起光強度の閾値が低い傾向が得られた。すなわち、窒素雰囲気にするだけで、TDAF から DPBF へのエネルギー移動が起こりにくくなることを見出した。TDAF の単一成分薄膜を利用した WGM 共振器では、励起光強度の閾値が雰囲気依存することはなかった。したがって、上述の閾値の雰囲気依存性は、DPBF または TDAF/DPBF 由来の現象である。DPBF が三重項励起子を生成した場合、その励起子は大気中の酸素により消光される可能性が、最近、他グループから報告されている。このことを踏まえると、窒素雰囲気により DPBF の三重項励起子が消光されず励起子密度が高い状態を保持し得て、TDAF からのエネルギー移動効率が鈍化した可能性がある。

以上の結果から、WGM における自然放射増幅光の発振閾値を一重項分裂現象の評価に利用できる可能性を見出した。今後の展開として、上述の解釈の真偽を検証すると共に、WGM 共振器を利用することにより一重項分裂を加速することが可能か否かについて調査することを検討している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shimomoto, S.; Kadoya, T.; Tanimura, T.; Maenaka, K.; Yokomatsu T.; Komino, T. Tajima, H.	4. 巻 125
2. 論文標題 Accumulated Charge Measurement: Control of the Interfacial Depletion Layer by Offset Voltage and Estimation of Band Gap and Electron Injection Barrier	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. C	6. 最初と最後の頁 1990-1998
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c04974	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 Tanimura Toshiaki, Tajima Hiroyuki, Ogino Akinari, Miyamoto Yuta, Kadoya Tomofumi, Komino Takeshi, Yokomatsu Tokuji, Maenaka Kazusuke, Ikemoto Yuka	4. 巻 74
2. 論文標題 Accumulated charge measurement using a substrate with a restricted-bottom-electrode structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Organic Electronics	6. 最初と最後の頁 251 ~ 257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.orgel.2019.07.009	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 Kameda Akihiro, Shimomoto Sunao, Tajima Hiroyuki, Yamada Jun-ichi, Yokomatsu Tokuji, Maenaka Kazusuke, Komino Takeshi	4. 巻 125
2. 論文標題 Mode Coupling of Whispering Gallery Modes through Organic Semiconductor Thin Films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 14940 ~ 14946
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.1c02665	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 Kameda Akihiro, Tajima Hiroyuki, Yamada Jun-ichi, Komino Takeshi	4. 巻 243
2. 論文標題 Whispering gallery modes in bowl-shaped stilbene microresonators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Luminescence	6. 最初と最後の頁 118654 ~ 118654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jlumin.2021.118654	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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 亀田章弘，豊田隼平，下元純，田島裕之，小簀剛
2. 発表標題 ウィスパリングギャラリーモードによる発光の先鋭化現象評価系の構築と発光性有機半導体薄膜への応用
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 亀田章弘，下元純，田島裕之，小簀剛
2. 発表標題 有機半導体から成るマイクロ共振器 2次元アレイの作製とその発光特性
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 2020年

1. 発表者名 下元純，角屋智史，谷村利精，前中一介，横松得滋，小簀剛，田島裕之
2. 発表標題 蓄積電荷測定法による金属/有機半導体界面の電荷注入障壁測定
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 大村 祐一、田島 裕之、小簀 剛、谷村 利精、下元 純、角屋 智史
2. 発表標題 蓄積電荷測定法による金/ペンタセン界面の電荷注入障壁測定
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 下元 純、田島 裕之、小藁 剛、谷村 利精、大村 祐一、角屋 智史、前中 一介、横松 得滋
2. 発表標題 蓄積電荷測定法による金属/フタロシアニン界面の電荷注入障壁測定
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷村 利精、荻野 晃成、宮本 裕太、角屋 智史、小藁 剛、横松 得滋、前中 一介、田島 裕之
2. 発表標題 制限背面電極型素子を用いた蓄積電荷測定法による電荷注入障壁測定
3. 学会等名 分子科学会2019名古屋
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下元 純、荻野 晃成、田島 裕之、小藁 剛、谷村 利精、角屋 智史、前中 一介、横松 得滋
2. 発表標題 蓄積電荷測定法による金属/フタロシアニン界面の電荷注入障壁測定
3. 学会等名 分子科学会2019名古屋
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大村 祐一、宮本 裕太、田島 裕之、小藁 剛、谷村 利精、下元 純、角屋 智史、前中 一介、横松 得滋
2. 発表標題 蓄積電荷測定法による金/ペンタセン界面の電荷注入障壁測定
3. 学会等名 分子科学会2019名古屋
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kameda, A.; Shimomoto, S.; Tajima, H.; Yamada, J.-I.; Yokomatsu T.; Maenaka, K.; Komino, T.
2. 発表標題 Long-range mode coupling of 2D microdisks array made of organic semiconductor thin films and its controllability
3. 学会等名 2021年光化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀田章弘, 下元純, 田島裕之, 山田順一, 横松得滋, 前中一介, 小簀剛
2. 発表標題 有機半導体から成るマイクロ共振器2次元アレイの長距離モード結合とその制御性
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2021年度第2回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸川恭輔, 三ヶ尻智紀, 田島裕之, 山田順一, 小簀剛
2. 発表標題 光WGM共振器による一重項分裂の評価
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 亀田章弘, 下元純, 田島裕之, 山田順一, 横松得滋, 前中一介, 小簀剛
2. 発表標題 金属 WGM 共振器を用いた伝搬型表面プラズモンポラリトン共鳴による有機薄膜からの発光のスペクトル先鋭化手法の検討
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 三ヶ尻智紀, 田島裕之, 山田順一, 小簗剛
2. 発表標題 エネルギー移動を起こす分子系を用いた光WGM共振器とその発光特性
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2022年度第1回講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

兵庫県立大学理学研究科機能性物質学I講座ホームページ
https://www.sci.u-hyogo.ac.jp/material/func_mat1/index-j.html

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

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