

令和 4 年 5 月 17 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05307

研究課題名（和文）多層膜系の近接場Fano共鳴の光機能化と応用に関する研究

研究課題名（英文）Photofunctional Near-Field Fano Resonances in Multilayer Systems and Their Applications

研究代表者

林 真至（Hayashi, Shinji）

神戸大学・工学研究科・名誉教授

研究者番号：50107348

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）：従来、ナノ構造が示すFano共鳴光学応答は、構造が決まれば固定されてしまい、外部から制御したり、機能性を発揮させることが困難であった。本研究では、Fano共鳴を示す多層膜構造に、フォトクロミック分子、蛍光分子を埋め込むことで、Fano共鳴形状を外部光照射により大幅に制御したり、蛍光スペクトル上にFano共鳴を発現させることに成功した。本研究で示されたFano共鳴の光機能性は、種々の新しい光デバイスの開発に応用することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のFano共鳴の研究では、遠距離場光学応答に重点が置かれており、局所場や近接場の振舞いに関しては、深く追求されてこなかった。多層膜系のFano共鳴に光機能性を付与する研究を遂行するうちに、多層膜構造内部での局所場の振舞いが、Fano共鳴形状を生み出す上で本質的な役割を果たしていることが明らかになってきた。このことは、学術的に重要であるのみならず、局所場や近接場のみで動作する、従来には存在しない新しいタイプの光学デバイスの設計指針を与えるもので、今後様々な光応用技術につながることを期待できる。

研究成果の概要（英文）：Normally, optical Fano responses in nanostructures are fixed by their structures and it is difficult to control them by external perturbations. Adding the functionality to the resonances is also difficult. In the present work, doping photochromic molecules and fluorescent molecules into Fano-resonant multilayer structures, we have succeeded in controlling the Fano resonances by external light irradiation. We also succeeded in generating the Fano line shapes in fluorescence spectra. The photo-functional Fano resonances achieved in this work can be applied to develop new types of optical devices.

研究分野：光工学

キーワード：Fano共鳴 多層膜 ATR分光 蛍光分光 フォトクロミック分子 蛍光分子 局所電場 導波路

1. 研究開始当初の背景

Ugo Fano は 1935 年に、原子が示す非対称なスペクトル形状を、離散的な量子状態と連続的な量子状態の干渉の結果であると説明した。それ以来、非対称なスペクトル形状は **Fano 共鳴** 形状と呼ばれ、波の干渉を伴う様々な物理系で研究されてきた。特に近年は、ナノ構造の光学応答に現れる **Fano 共鳴** が注目され、新しい光学素子への応用を目指して精力的に研究されている。我々は、構造が比較的簡単な多層膜系が示す **Fano 共鳴** に着目し、5 年以上に渡り **Attenuated Total Reflection (ATR)** スペクトルに現れる **Fano 共鳴** の研究に実験、理論の両面から取り組んできた。その結果、金属と誘電体から成る多層膜系、全て誘電体から成る多層膜系で、高い **Q** 値を持つ **Fano 共鳴** を実現でき、高感度のバイオセンサー等に応用できることを示すことができた。ただ、それらの研究では、一度試料構造が定めれば、**Fano 共鳴** スペクトルは固定されてしまい、自由度が乏しいのが難点であった。従って、**Fano 共鳴** スペクトルを外部から制御したり、単に **ATR** スペクトル上のみならず蛍光スペクトル上に発現させるなど、**Fano 共鳴** に新たな機能性を付与することが望まれていた。

2. 研究の目的

本研究は、上記のような状況を打破するために、多層膜系の **Fano 共鳴** に対して「光機能性」を付与すること、さらに多層膜系特有の **Fano 共鳴** 発現のメカニズムを明らかにすることを目的とした。付与する「光機能性」として、**Fano 共鳴** 形状の光制御及び **Fano 共鳴** 発光を取り上げた。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために用いた多層膜構造は、図 1 に示したようなものである。基本的には、2 つの平面導波路層がスペーサーを隔てて配置された構造で、それぞれの導波路層が保持する導波モードがスペーサー内の近接場を介して結合できるようになっている。非輻射的な導波モードを励起し観測するために、外部光との結合を可能にする高屈折率のプリズムを配した ATR 構造を取っている。従来、同様の構造の ATR スペクトルで、鋭い **Fano 共鳴** が観測されていたが、さらに光機能性を発現させるために、本研究では導波路層に光機能性の分子をドーピングする手法を用いた。**Fano 共鳴** の光制御のためには、フォトクロミック分子、蛍光スペクトル上に **Fano 共鳴** を発現させるためには蛍光分子を用いた。

実際の試料は、スペーサー層として polyvinyl alcohol (PVA) 膜、導波路層として polystyrene (PS) 膜を用い、スピコート法で作製した。光学測定は、2 軸の試料回転台を持つ ATR 装置と、可視・紫外励起光源、また光ファイバーで光を取り込める蛍光測定装置を組み合わせおこなった。

測定結果の解析、理論的な検討は、主として 2x2 transfer matrix 法による反射率、電場分布の電磁気的計算により行った。また、蛍光スペクトルの解析のため、振動する双極子のモデルに基づいて発光強度の理論計算を行った。

4. 研究成果

以下に、**Fano 共鳴** の光制御、蛍光スペクトル上での **Fano 共鳴** の発現、さらに多層膜系での局所電場の振舞い、それぞれに関して本研究で得られた成果について述べる。

(1) **Fano 共鳴** の光制御：

従来の研究で、Disperse Red 1(DR1)分子を導波路層にドーピングし、外部光で光異性を誘起することにより、**Fano 共鳴** の位置をシフトさせたり、共鳴形状を変化させたりできることが分かっている[文献]。しかし、それらの光制御の度合いは小さく、大幅な光制御を実現することが望まれていた。そこで、本研究では、図 2 (a) に示した試料の HLG (Half leaky guided) 層、又

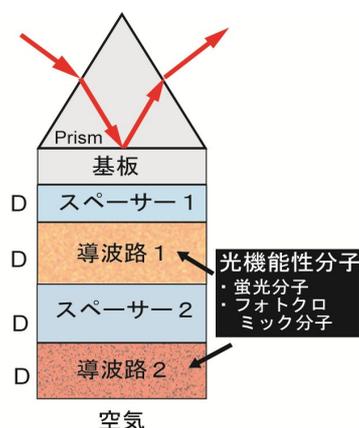


図 1 研究に用いた試料の基本構造

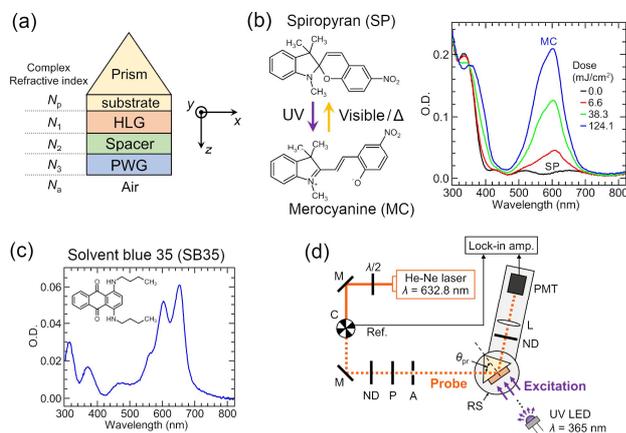


図 2 (a) 試料構造、(b) Spiropyran 分子の UV 光照射による構造変化と光吸収スペクトルの変化、(c) Solvent blue 分子の光吸収スペクトル、(d) 光学測定配置 (文献より)

は PWG (Planar waveguide) 層にフォトクロミック分子である Spiropyran (SP) 分子をドープすることにより、Fano 共鳴を UV 光照射で大幅に制御することを試みた。SP 分子は、図 2 (b) のように、UV 光照射により大きく構造を変え、同時にもともと吸収がなかった波長 600 nm 付近に強い光吸収バンドを示すようになる。実験では、SP 分子を HLG 層にドープした Sample A、PWG 層にドープした Sample B について、図 2 (d) の測定配置で UV 光の照射総量 (dose) を変化させながら、波長 632.8 nm での角度スキャン ATR スペクトルを測定した。尚、色素分子 Solvent blue (SB35) は、SP 分子をドープしていないもう一方の導波路層にドープし、その層での光吸収量を調整するために用いた。

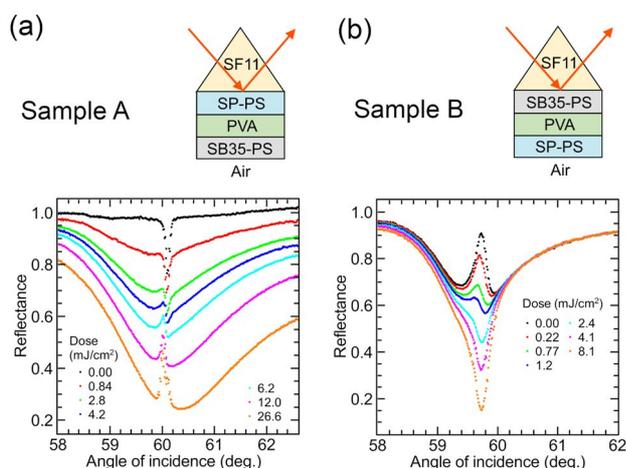


図 3 UV 光照射量を変化させながら測定した ATR スペクトル (文献 より)

図 3 (a)、(b) はそれぞれ Sample A、B について得られた ATR スペクトルである。図 3 (a) にみられるように、Sample A は UV 光照射前には反射スペクトル中に鋭い落ち込みを示す。ところが、UV 光照射量を増加させていくと、スペクトル形状が鋭い落ち込みから非対称性の高い Fano 形状に変化し、さらに上に凸な Electromagnetically Induced Transparency (EIT) の形状へと大幅に変化する。Sample B のスペクトルは、UV 光照射量の増加に伴い、逆に EIT 形状から Fano 形状を経て、下に凸な落ち込みの形状へと、こちらも大幅に変化する。このように、本研究では、多層膜構造に SP 分子をドープすることで、光照射によりスペクトル形状を大幅に制御することに成功した。

詳しい解析によれば、SP 分子をドープした PS 単層膜に比較して、多層膜系に埋め込まれた SP ドープ PS 膜の方が約 100 倍高いフォトクロミック効果を示すことが示唆された。このような高いフォトクロミック効果は、SP 分子がドープされている PS 導波路層での局所電場が、著しく増強されていることに起因している。ATR スペクトルの大幅な変化にも、多層膜内での局所電場の振舞いが関与しており、局所場の振舞いが非常に重要であることが結論された。

(2) 蛍光スペクトル上での Fano 共鳴の発現:

通常の蛍光測定と同様に、我々の多層膜系でも、蛍光励起スペクトルと蛍光発光スペクトルの両方が存在する。一般に、蛍光励起スペクトルは、蛍光強度を測定する際に発光波長を固定し、励起光の波長をスキャンして得られる。一方、蛍光発光スペクトルは、波長を固定して蛍光を励起し、発光波長をスキャンして蛍光強度を測定することによって得られる。蛍光励起スペクトルは、蛍光の励起プロセスに関する情報を、蛍光発光スペクトルは発光プロセスに関する情報を与える。本研究では、角度スキャン ATR 法によって蛍光を測定するので、プリズム側からある波長の励起光を入射し、入射角をスキャンしながら、空気側からある波長の蛍光強度を特定の発光角度で測定する場合を、蛍光励起スペクトルと呼ぶ。また、空気中からある角度で試料を励起し、プリズム側から角度をスキャンしながら蛍光強度を測定する場合を、蛍光発光スペクトルと呼ぶ。以下にそれぞれの場合についてえられた成果について述べる。

蛍光励起スペクトル上への Fano 共鳴の発現

図 4 (a) に示したように、多層膜系に発光機能を持たせるために、蛍光色素である DCM 分子をドープした PS 導波路層 1 (WG1) を有する試料構造を作製した。図 4 (b) から分かるように、DCM-PS 膜は波長 470 nm 付近にピークを持つ光吸収バンドを示し、600 nm 付近にピークを持つ蛍光発光スペクトルを示す。図 4 (c) のように、蛍光の励起は、459 nm のレーザー光をプリズム側から入射し、角度スキャン ATR 配置で行った。発光側については、試料面に垂直に放射される蛍光をバンドルファイバーで分光器まで導き、波長 580 nm の蛍光強度を測定した。

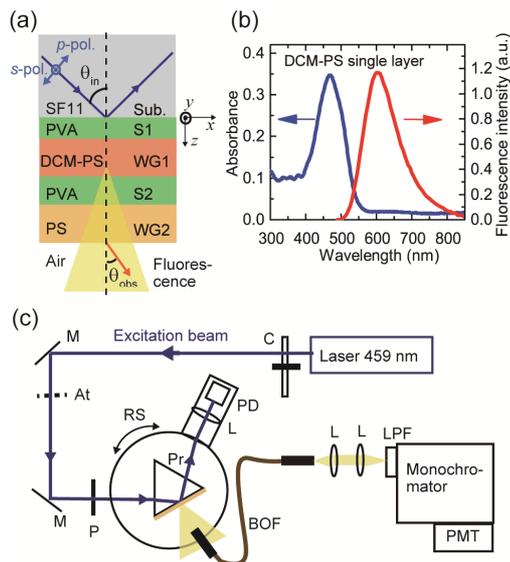


図 4 蛍光励起スペクトル測定。(a) 試料構造、(b) DCM ドープ PS 膜の吸収及び蛍光スペクトル、(c) 蛍光測定配置 (文献 より)

図5は、入射光を s-偏光とした場合に得られた、蛍光励起スペクトルである。図から分かるように、60度付近にピークを持つブロードな発光バンドの高角度側約61度の位置に鋭い非対称形状、つまり Fano 共鳴形状が明確に観測されている。この結果は、従来はATR スペクトル(反射スペクトル)中にしか観測されていなかった Fano 共鳴が、蛍光スペクトル上でも観測されることを物語っている。

DCM 色素分子による発光を、双極子モデルで記述し、多層膜系に埋め込まれた双極子からの発光強度を、理論的に計算した。図5の実線は、理論計算の結果である。理論値は実験より約2倍程度大きく出ているが、観測された Fano 共鳴形状は理論により非常に良く再現されていることが分かる。蛍光の励起スペクトルは、本質的には色素分子の励起プロセスつまり光吸収プロセスによって決定されており、図5の結果には WG1 導波路層内の局所場によって決まる光吸収の振舞いが反映されている。この結果からも、導波路層内の局所場の振舞いが、多層膜系での Fano 共鳴にとって重要な役割を果たしていることが示唆される。

蛍光発光スペクトル上への Fano 共鳴の発現

蛍光励起スペクトルの測定と類似した試料構造を用いて、蛍光発光スペクトルの測定も行った。空気側から波長 459 nm のレーザー光を試料面に垂直に入射して蛍光を励起し、波長 633 nm での発光強度をプリズム側で角度をスキャンしながら測定した(逆 ATR 配置)。

図6(a)は、WG1層のみが存在する試料からの発光強度の角度分布を示したものであるが、±60度付近に強い指向性をもった発光が観測される。これは、金属表面の表面プラズモンを介した発光である SPCE (Surface Plasmon coupled Emission) と類似の発光である。図6(b)は、角度の関数として発光強度をプロットしたもので、測定結果は双極子モデルで計算した理論スペクトルと良く一致している。図6(c)は、WG1層とWG2層が共存する試料からの発光スペクトルであり、図6(b)には見られなかった発光強度の落ち込みを61.2度付近に持つ、Fano形状となっている。この落ち込みは、PWG1導波モードがPWG2導波モードと結合したことによって生じている。図6(c)の結果は、逆 ATR 配置での蛍光発光スペクトルに Fano 共鳴が出現していることを明確に示している。

図6(d)は、図6(c)の蛍光スペクトルを測定した試料と同じ試料の ATR スペクトルであるが、こちらの方には Fano 共鳴形状は現れていない。このことは、蛍光スペクトル上の Fano 共鳴と ATR スペクトル上の Fano 共鳴の発現メカニズムが異なっていることを物語っている。Lorentz の相反定理によれば、多層膜系に埋め込まれた双極子から多層膜系外部に放射される発光のスペクトルは、多層膜系外部から入射した光によって多層膜内の双極子の位置に誘起される電場強度(振幅の絶対値の2乗)のスペクトルに比例する。この原理により計算した発光の理論スペクトルは、図6(c)に示されているように実験結果と良く一致する。このことも、発光スペクトル上の Fano 共鳴も、導波路層内の局所場の振舞いによって決定されていることを示唆している。

(3) 導波路層内の局所電場の振舞い:

(1)に述べた ATR スペクトルに現れる Fano 共鳴、(2)に述べた蛍光スペクトル上での Fano 共鳴の解析結果は、どちらも多層膜系を構成する導波路内の局所電場の振舞いが、スペクトル形状を決定する大きな要因になっていることを示唆している。通常、導波路内の局所電場を実験的に調べることは困難であるが、特に(2)の蛍光スペクトルに関する成果は、蛍光スペクトルの測定から局所電場の振舞いを実験的にモニターできることを物語っている。そこで、さらに局所場に関して知見を深め、また導波路モード間の相互作用が強い場合のスペクトル変化も探るため、WG1層、WG2層それぞれに異なる蛍光色素をドーブした試料について、詳しい研究を行った。

図7(a)に示したように、WG1層としてPS層にDCM分子をドーブしたもの、WG2層としてPS層にCoumarin 314 (C314)分子をドーブした試料を用いた。図7(b)上段の吸収スペクトルから分かるように、波長441nmで試料を励起すると、両方の蛍光分子を励起することができる。一方、

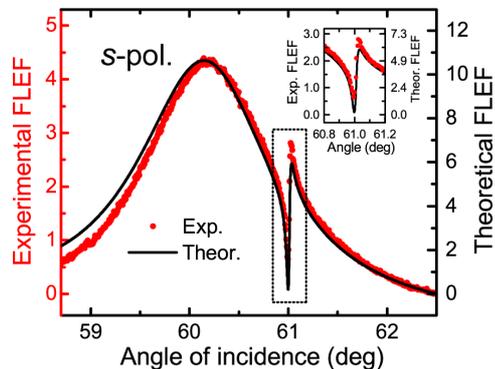


図5 入射光を s-偏光にしたときの入射角スキャン蛍光励起スペクトル (文献より)

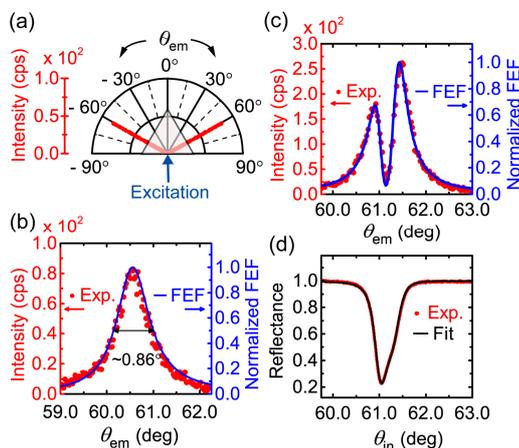


図6 (a)プリズム側への指向性発光、(b)単一WG1層からの発光、(c)WG1層とWG2層が共存する場合の Fano 共鳴発光、(d)ATR スペクトル (文献より)

波長 470 nm で蛍光をモニターすると C314 からの発光が、640 nm でモニターすると DCM 分子からの発光が、それぞれ独立にモニターできる。このことを利用すると、この試料系では単一の試料で、WG1 層及び WG2 層からの発光を、独立に測定することができる。モード間の結合の強さは、スペーサー S2 の厚みによって制御でき、膜厚 1000 nm 程度の弱結合領域から、膜厚 100 nm 以下の強結合領域まで、結合の強さを変化させ、実験を行なった。

図 8 (a)-(e) は、WG1 層 (640 nm でモニター) 及び、WG2 層 (470 nm でモニター) が発する蛍光の励起スペクトルである。(a) に示した S2 膜厚が 1190 nm の試料では、WG1 層からの Lorentz 型の発光ピークだけが見られ、WG2 層からの発光は非常に弱い。これは、S2 膜が厚いので、PWG1 モードとの結合が弱く、PWG2 が十分に励起されないためである。(b) の S2 膜厚 620 nm の場合には、結合はまだ弱い、PWG2 も十分に励起され、それに対応する鋭いピークがみられる。この時、WG1 層からの発光には小さな落ち込みがみられ、この領域は Fano 共鳴の領域に対応している。(c), (d) のさらに S2 膜厚が小さい領域では、PWG1 モードと PWG2 モードの結合が強くなり、それぞれの発光ピークが分裂する。結合の強さとともに、分裂の度合いは大きくなり、(d) の結果は強結合領域に対応する。図 8 (e)-(h) は、(a)-(e) の実験スペクトルに対応する理論スペクトルである。理論スペクトルは、実験スペクトルを良く再現している。双極子モデルからは、導波路層内に一様に分布した蛍光分子からの発光強度は、励起光によって誘起される導波路層内の局所電場の層全体に渡る積分に比例することが導かれる。従って、図 8 の実験結果は、WG1, WG2 導波路層の局所場の振舞いを実験的に調べる手段として、蛍光励起スペクトルの測定が非常に有効であることを、物語っている。

(4) Fano 共鳴での局所場の重要性

通常、種々のナノ構造での Fano 共鳴の研究は、反射、透過、散乱等のいわゆる遠距離場 (far field) の光学応答に注目して行われ、構造内部での局所電場や近接場の振舞いについては、深く追求されないことが多い。遠距離場応答と局所電場や近接場の振舞いは、必ずしも一対一対応せず、一般に対応関係は複雑である。しかし、本研究で得られた結果は、少なくとも多層膜系では、遠距離場応答である ATR スペクトルの形状を決める要因として、局所電場の振舞いが本質的な役割を果たすことを、示唆している。今後、さらに局所場の振舞いを詳細にわたって調べ、遠距離場応答での Fano 共鳴或いはその変化をもたらすメカニズムを追求する必要がある。局所場や近接場の研究は、それらのみで動作するデバイスの開発のためにも、必須である。

引用文献

- Motokura *et al.*, J. Appl. Phys., **125**, 223101 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5091820>.
 Motokura *et al.*, J. Appl. Phys., **127**, 073103 (2020); <https://doi.org/10.1063/1.5131681>.
 Kang *et al.*, J. Opt., **21**, 105006 (2019); <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ab42cf>.
 Kang *et al.*, AIP Advances, **10**, 075302 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0010930>.
 Motokura *et al.*, Phys. Rev. Applied, **16**, 064065 (2021); <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.064065>.

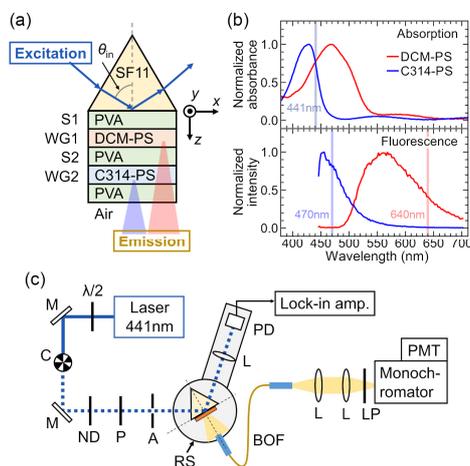


図 7 (a)試料構造、(b)蛍光色素 DCM と C314 の吸収、発光スペクトル、(c)蛍光測定配置 (文献より)

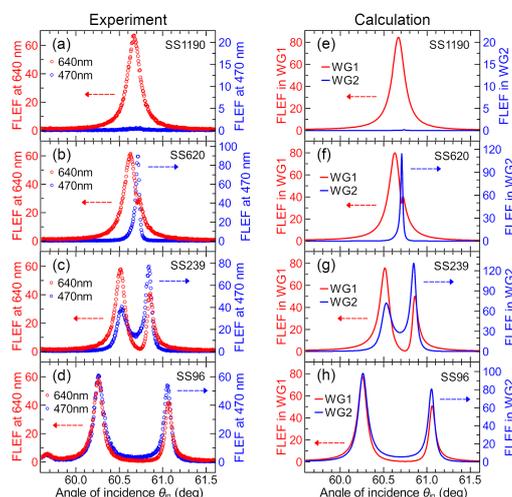


図 8 (a)-(d) スペーサー S2 の膜厚を 1190 nm ~ 96 nm まで変化させ、470 nm 及び 640 nm でモニターして得られた蛍光励起スペクトル、(e)-(h) (a)-(d) に対応する理論スペクトル (文献より)

図 8 (a)-(d) スペーサー S2 の膜厚を 1190 nm ~ 96 nm まで変化させ、470 nm 及び 640 nm でモニターして得られた蛍光励起スペクトル、(e)-(h) (a)-(d) に対応する理論スペクトル (文献より)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kang Byungjun, Motokura Kengo, Fujii Minoru, Nesterenko Dmitry V., Sekkat Zouheir, Hayashi Shinji	4. 巻 21
2. 論文標題 Fano resonant behaviour of waveguide mode in all-dielectric multilayer structure directly monitored by fluorescence of embedded dye molecules	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Optics	6. 最初と最後の頁 105006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2040-8986/ab42cf	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 Motokura Kengo, Kang Byungjun, Fujii Minoru, Nesterenko Dmitry V., Sekkat Zouheir, Hayashi Shinji	4. 巻 125
2. 論文標題 Light-controllable Fano resonance in azo-dye-doped all-dielectric multilayer structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 223101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5091820	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 Elhani S, Maouli I, Refki S, Halim M, Hayashi S, Sekkat Z	4. 巻 21
2. 論文標題 Quantitative analyses of optically induced birefringence in azo dye containing polymers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Optics	6. 最初と最後の頁 115401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2040-8986/ab42b8	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 Motokura Kengo, Kang Byungjun, Fujii Minoru, Nesterenko Dmitry V., Sekkat Zouheir, Hayashi Shinji	4. 巻 127
2. 論文標題 Wide-range line shape control of Fano-like resonances in all-dielectric multilayer structures based on enhanced light absorption in photochromic waveguide layers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 73103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5131681	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 Elhani S., Ishitobi H., Inouye Y., Ono A., Hayashi S., Sekkat Z.	4. 巻 10
2. 論文標題 Surface Enhanced Visible Absorption of Dye Molecules in the Near-Field of Gold Nanoparticles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 3913
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-60839-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nesterenko Dmitry V., Moujdi Sara, Hayashi Shinji, Sekkat Zouheir	4. 巻 127
2. 論文標題 Simulation of photochemically induced motion of matter in gradient light fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 243106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0011388	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 Kang Byungjun, Motokura Kengo, Fujii Minoru, Nesterenko Dmitry V., Sekkat Zouheir, Hayashi Shinji	4. 巻 10
2. 論文標題 Observation of Fano line shape in directional fluorescence emission mediated by coupled planar waveguide modes and interpretation based on Lorentz reciprocity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 75302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0010930	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Andam N., Refki S., Hayashi S., Sekkat Z.	4. 巻 11
2. 論文標題 Plasmonic mode coupling and thin film sensing in metal-insulator-metal structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 15093
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-94143-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nesterenko Dmitry V., Pavelkin Roman, Hayashi Shinji, Sekkat Zouheir, Soifer Victor	4. 巻 16
2. 論文標題 Fano Approximation as a Fast and Effective Way for Estimating Resonance Characteristics of Surface Plasmon Structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasmonics	6. 最初と最後の頁 1001 ~ 1011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11468-020-01364-8	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 Motokura Kengo, Fujii Minoru, Nesterenko Dmitry V., Sekkat Zouheir, Hayashi Shinji	4. 巻 16
2. 論文標題 Coupling of Planar Waveguide Modes in All-Dielectric Multilayer Structures: Monitoring the Dependence of Local Electric Fields on the Coupling Strength	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 064065-1 ~ 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.16.064065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計4件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Shinji HAYASHI
2. 発表標題 Photofunctional Fano resonances realized in multilayer structures
3. 学会等名 7th Int. Conf. Information Technology and Nanotechnology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本倉健吾、藤井稔、林真至
2. 発表標題 結合導波モード局所電場の蛍光を用いた直接観察
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinji HAYASHI
2. 発表標題 Realization and control of Fano resonances in multilayer systems
3. 学会等名 5th Int. Conf. Information Technology and Nanotechnology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinji HAYASHI
2. 発表標題 Surface plasmon resonances revisited as Fano resonances
3. 学会等名 Int. Symposium on Plasmonics and Nanophotonics (iSPN2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本化学会	4. 発行年 2019年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 216
3. 書名 プラズモンと光圧が導くナノ物質科学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Mesoscopic Materials Research Laboratory http://www.lab.kobe-u.ac.jp/eng-nano/index.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
研究 分 担 者	藤井 稔 (Fujii Minoru) (00273798)	神戸大学・工学研究科・教授 (14501)	

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			
ロシア連邦	Samara National Research University			
モロッコ	MASCIR			