

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540316

研究課題名(和文) 高分子との相互作用による半導体量子ドットの発光特性制御

研究課題名(英文) Control of photoluminescence properties in semiconductor quantum dots by using the interaction with polymers

研究代表者

中西 俊介 (NAKANISHI SHUNSUKE)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：30155767

研究成果の概要(和文)：まず，core/shellタイプの半導体量子ドットであるCdSe/ZnSが高分子との相互作用により発光特性が改善されることを確認した。次に，高分子の代わりに金属ナノ粒子，TiO<sub>2</sub>ナノ粒子との相互作用による，マクロな発光特性(蛍光スペクトル，蛍光寿命)と単一量子ドットの発光特性(蛍光スペクトル，蛍光寿命，Blinking)の変化を調べ，TiO<sub>2</sub>ナノ粒子の場合にはBlinking特性が改善されることを見いだした。さらに，量子ドット溶液のフェムト秒位相緩和時間が溶媒の種類により大きく変化するという新規な効果を見いだした。

研究成果の概要(英文)：We have examined that photoluminescence(PL) properties of core/shell-type semiconductor quantum dots (QDs) CdSe/ZnS are improved by the interaction with the polymers in solution. Next, we have studied the PL properties (spectra, lifetime, blinking) in both macroscopic and single QD level by the interaction with metal and TiO<sub>2</sub> nanoparticles and found out the blinking property of single QDs can be improved by the interaction with TiO<sub>2</sub>. Further, we have observed a novel effect of solvent molecules on femtosecond optical phase relaxation of QDs in solutions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：レーザー光物性

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：量子ドット，CdSe/ZnS，高分子，TiO<sub>2</sub>ナノ粒子，金属ナノ粒子，Blinking，位相緩和，四光波混合

## 1. 研究開始当初の背景

化学合成法により作製された半導体量子ドット(Quantum Dots, QDs)についての研究が国内外ともに精力的に行われるようになってきており、生体イメージングや光デバイスへの応用研究も盛んに行われていた。しかし、その発光特性の基礎的な理解についてはまだ未解明の部分が多くあった。例えば、半導体量子ドットの発光はマルチ指数関数減衰

をすることがよく知られおり、その由来はdark exciton、表面欠陥準位およびトラップ準位からの発光と考えられていたが、その同定は確立されていない状態であった。また、単一量子ドットや量子ドットクラスターはblinkingと呼ばれる明滅現象を示し、その原因がオージェ過程や環境分子による電子捕獲と想定されていたが、未解明の状況であった。

このような研究状況の中で我々はコア型 CdSe QD 溶液に高分子を添加することにより以下のような現象を観測していた。

- QD 溶液において高分子を添加すると、高分子の種類により蛍光が増強する場合と減少する場合がある
  - クロロフォルム溶液において高分子存在下で UV 光を照射すると発光強度が大幅に増強する、蛍光寿命が予想に反して短くなる
- これらの観測結果は、QD と高分子の相互作用により QD の発光特性が大きな影響を受けることを示していた。この観測結果をもとに、QD と高分子の相互作用に関する詳しい知見を得れば QD の発光特性の制御が可能ではないかと発想し、研究目的を設定した。

## 2. 研究の目的

本研究では上記のような研究背景をもとに、「高分子との相互作用による半導体量子ドットの発光特性制御」について詳しい微視的な知見を得ることを目標に、次のような項目について調べることを目的とした。

- コア・シェル型 CdSe/ZnS QD 溶液中で高分子が量子ドットの発光特性に及ぼす影響
- コア・シェル型 CdSe/ZnS QD 溶液における、高分子環境が励起された量子ドット中電子のエネルギー緩和に及ぼす効果
- 高分子中に分散したコア・シェル型 CdSe/ZnS QD の blinking 特性の制御
- 高分子による他種のコア・シェル型 CdTe/ZnS QD の発光特性制御

しかし、研究成果のところでも示すように、当初の研究目的どおりに成果が得られなかった部分もあり、逆に研究目的を達成するために行った実験から派生したテーマが実りある結果をもたらした部分もあった。総体としてみれば、本研究では予想していた以上の成果を上げることができたと判断している。

## 3. 研究の方法

### (1) 試料の作製

研究に用いたコア・シェル型 QD CdSe/ZnS は Invitrogen 社から有機溶媒可溶性のものを購入した。購入した QD は、メタノール・イソプロパノール混合溶液を加えて遠心分離することにより凝集させたあと、トルエン、クロロフォルム、テトラヒドロフラン (THF) などの溶媒に溶かした。この処理により、溶液状で均一な QD 溶液を作製した。QD の光学特性を制御するための高分子としては、poly (dimethyl siloxane) (PDMS), poly (vinyl pyrrolidone) (PVP), poly (butadiene) (PBD) を用いた。また、高分子に代わる物質で光学特性制御を行うために、銀ナノ粒子、TiO<sub>2</sub> ナノ粒子を購入し、QD 溶液等に添加した場合の QD の蛍光スペクトル、蛍光寿命などの変化を測定した。

QD の blinking 特性は、単一 QD を対象に測定するため、溶液状では測定が不可能である。QD の blinking 特性の測定のために、ガラス基板上に QD を固定する前処理を行ったあとに、光学特性制御を行う高分子、銀ナノ粒子、TiO<sub>2</sub> ナノ粒子の溶液を添加して、blinking に対するその効果を測定した。ガラス基板上に QD を固定するため、次のような方法を用いた。

- ガラス基板の表面をシラン化する
- シラン化した表面に biotin 3-sulfo N-hydroxysuccinimide ester を結合させる
- biotin 3-sulfo N-hydroxysuccinimide ester と QD を結合させる

この処理により QD をガラス基板表面に固定することができた。図 1 はこの化学処理を模式的に示したのものである。B, C はガラス基板に固定した QD の AFM 画像であり、C は QD の上に TiO<sub>2</sub> の薄膜を付けた場合のものである。

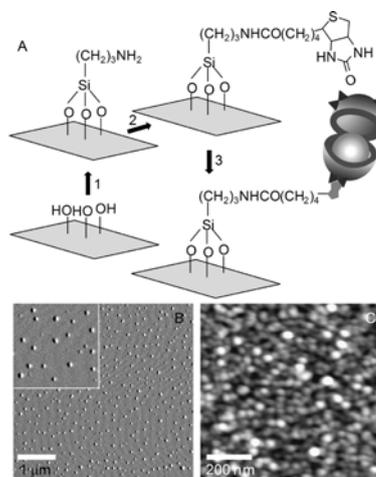


図 1: QD のガラス基板への固定方法 (A) と QD 分布の AFM 画像 (B, C)

(2) QD 試料におけるマイクロな QD の分布状態は AFM 画像を測定して評価した。(図 1 B, C を参照)

(3) QD の光学特性の測定

### ① 吸収, 蛍光スペクトルの測定

QD 溶液の吸収スペクトル, 蛍光 (PL) スペクトルはそれぞれ分光光度計, 蛍光分光光度計を用いて行った。図 2 に測定例を示す。

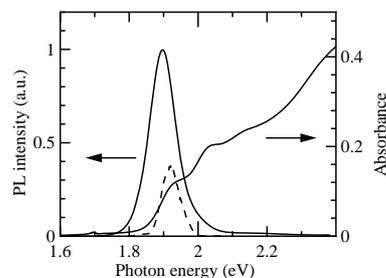


図 2: CdSe/ZnS QD 溶液の吸収, 蛍光スペクトル。破線は励起レーザー光のスペクトル

## ②単一 QD の blinking 特性の測定

単一 QD の blinking 特性は、広視野ビデオ顕微鏡システムを用いて計測した。このシステムは、光検出部にイメージンテンシファイアとフォトンカウンティング CCD を備えており、532nm の CW レーザーにより励起された単一 QD からの蛍光光子数の経過を時間分解能 10ms で測定することができる。

## ③QD からの蛍光の寿命測定

QD の蛍光寿命の測定では、チタンサファイア再生増幅器(200kHz)出力光の倍波パルス(400nm, 150fs)を励起光として使用した。QD からの蛍光を分光器で分光した後、フォトンカウンティングストリークカメラで蛍光緩和を測定し、寿命を求めた。

## ④QD 溶液におけるフェムト秒四光波混合の測定

QD 溶液の位相緩和を測定するためにフェムト秒四光波混合(Four-wave mixing, FWM)の実験を行った。この測定に用いた光源は、チタンサファイア再生増幅器(1kHz)励起の OPA の出力パルス(1300nm, 35fs)の第二高調波である。第二高調波のスペクトルは図 2 に点線で示されている。FWM 信号の測定は、励起光をビームスプリッターで 2 つに分け、一方を他方に対して時間遅延をかけた後、試料に図 3 のように励起する。 $2\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_1$  方向に放出される FWM 信号を、2 つの励起パルス間の遅延時間  $\tau$  の関数として測定する。FWM 信号の  $\tau$  に対する緩和から、溶液中の QD の位相緩和時間を測定した。

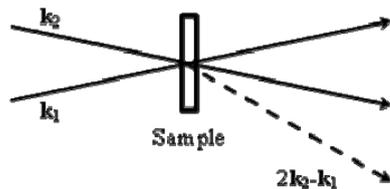


図 3: 四光波混合(FWM)信号の励起配置

## 4. 研究成果

### (1) コア・シェル型 CdSe/ZnS QD における高分子による発光特性変化

我々が本研究を開始するまでにコア型 CdSe QD で確認していた高分子による発光特性変化について、コア・シェル型 CdSe/ZnS QD でも同様な測定を行った。その結果をまとめると以下ようになる。

- QD 溶液に高分子を添加すると、PDSM, PBD では蛍光強度はほとんど変化しないが、PVP では強度が減少した。
- QD 溶液に高分子を添加した状態で UV 光を照射すると、3 つの高分子とも蛍光の量子効率に添加しない場合と比べて向上した。

• QD 溶液に高分子を添加した状態で UV 光を照射した後の蛍光寿命の変化を測定すると、蛍光寿命が延びるもの、短くなるもの、あまり変化がないものと結果が分かれた。これらの結果はコア型 CdSe QD についての結果とほぼ同様であった。このような高分子の効果を電子のダイナミクスとの関連で調べるための pump-probe 信号は測定することができなかった。この原因は不明である。また、高分子との相互作用による blinking 特性変化を測定するために、高分子に QD を分散させた試料の作製を行ったが、QD の凝集を回避することができず、単一量子ドットの blinking 特性の測定に成功しなかった。高分子による光学特性変化がコア型 CdSe 量子ドットと同じで新規性に乏しいこと、これらの光学特性変化の起源である電子のダイナミクスを解明できなかったため、これらの結果は論文として公表しなかった。

### (2) 銀ナノ粒子による CdSe/ZnS QD の光学特性制御

金属の表面に QD を分散させると QD の量子効率が增強されるという報告例を参考に、銀ナノ粒子との相互作用による QD の光学特性変化を調べた。この研究にはピーク蛍光波長が 605nm である市販の QD を用いた。銀ナノ粒子の直径は約 20nm であった。

まず、QD 溶液に銀ナノ粒子溶液を加えた場合の PL スペクトルと蛍光寿命を測定した。図 4 に示すように、PL スペクトルの形状は変化しなかったが、PL 強度は銀粒子の濃度を上げると減少した。また、蛍光寿命は銀ナノ粒子の添加により非常に速くなった。これらの結果は、銀ナノ粒子との相互作用により光学特性が大きく影響を受けたことを示している。

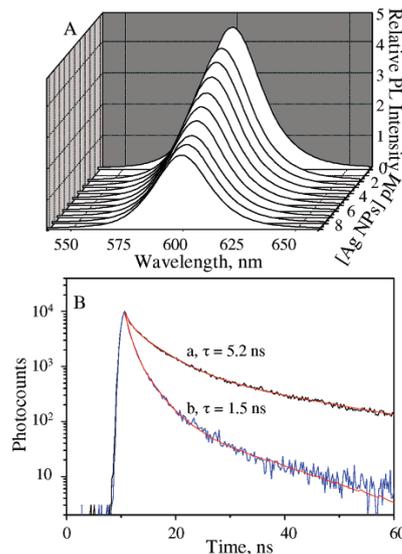


図 4 A: 銀ナノ粒子の添加による PL スペクトル変化, B: 銀ナノ粒子による蛍光寿命の変化 (a: 銀ナノ粒子なし, b: 銀ナノ粒子あり)

銀ナノ粒子の添加により励起された QD の電子から超高速に銀ナノ粒子へエネルギー移動が生じていると考えることにより、これらの観測結果を説明することができる。

次に、単一 QD に対する銀ナノ粒子の効果、特に blinking 特性について測定を行った。この場合の試料は、非常に低濃度の QD+Ag nanoparticle 溶液をガラス基板上に滴下して引き伸ばし、乾燥させた。QD の分布状態を AFM 画像で確認した後、ビデオ顕微鏡システムで blinking 特性を測定した。図 5 はその測定結果である。銀ナノ粒子がない場合 (a) に比べて、顕微鏡下で PL 強度が少し弱い単一 QD の場合 (c, d) には、PL の光子数は下がるものの、暗状態で光子数が 0 にならないことが観測された。

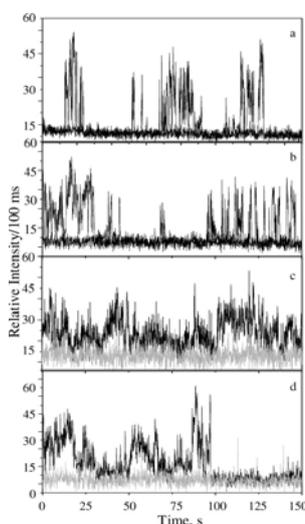


図 5 : 単一 QD の PL の時間経過

この blinking の結果は、銀ナノ粒子との相互作用により PL 強度は減少するものの、blinking 特性は改善されることを示している。いろいろな単一 QD の蛍光寿命を測定しその統計的な分布を調べることから、銀ナノ粒子への超高速エネルギー移動が、blinking 現象を引き起こすと考えられる Auger 過程や表面欠陥準位への電子捕獲を抑制していることを結論づけることができた。

### (3) TiO<sub>2</sub> ナノ粒子による CdSe/ZnS QD の光学特性制御

TiO<sub>2</sub> ナノ粒子は電子吸引力が強く、色素増感太陽電池の基板材料としても用いられる。このナノ粒子と QD とを相互作用させることで、上記の銀ナノ粒子の場合と同様に QD の blinking 特性を改善させることが可能ではないかと考えて、この研究を行った。まず、TiO<sub>2</sub> ナノ粒子の影響をマクロレベルで調べるために、QD 溶液に TiO<sub>2</sub> ナノ粒子溶液を添加した場合の PL スペクトルと蛍光寿命を測定した。図 6 はその結果である。TiO<sub>2</sub> ナノ

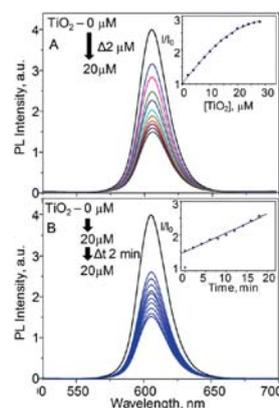


図 6 : QD の PL スペクトルに対する TiO<sub>2</sub> ナノ粒子の効果

粒子の濃度を増加させる (A)、ナノ粒子を添加したあと時間を待つ (B) ことにより、PL 強度が減少することが分かる。TiO<sub>2</sub> ナノ粒子の濃度を増やす場合には、その効果が飽和する傾向がある。

次に溶液レベルと単一 QD レベルでの蛍光寿命に対する TiO<sub>2</sub> ナノ粒子の効果をストリークカメラで計測した。単一 QD レベルでの計測では図 1 に示すような方法で QD をガラス基板に固定して測定を行った。銀ナノ粒子との類推からの予想に反して、QD の蛍光寿命に対する影響はほとんど見いだせなかった。PL 強度の減少から判断して、QD から TiO<sub>2</sub> 粒子への電子移動は起こっていると思われるので、電子移動の速度がもとの蛍光寿命より遅いと推測される。

図 7 は 4 つ (A, B, C, D) の単一 QD の PL 強度の時間経過を、TiO<sub>2</sub> 粒子添加の前後で測定した結果をまとめたものである。a は PL 強度の時間経過、b, c はそれぞれ添加前後の PL 強度の出現頻度を表したグラフである。個々の QD ごとに TiO<sub>2</sub> 粒子による blinking への効果が異なることが分かる。それぞれで ON 時間の出現頻度が上昇しているが、特に注目すべきは C の QD である。TiO<sub>2</sub> 粒子添加によりほとんど OFF 時間が消失し、常に発光できる状態になっていることが分かる。この QD については、TiO<sub>2</sub> 粒子添加によりほぼ完璧に blinking を抑制できていることを表している。

このような実験結果は、次のように考えれば説明できる。TiO<sub>2</sub> ナノ粒子との相互作用により、blinking を引き起こす励起された QD の電子が Auger イオン化過程や表面欠陥準位へ捕捉されるチャンネルのほかに新しい電子移動の経路が作成され、その電子移動の速度が QD と TiO<sub>2</sub> 粒子の距離によって変わるため、個々の QD で TiO<sub>2</sub> 粒子添加の効果が違ってくる。TiO<sub>2</sub> 粒子との距離が近いと、非常に高速に励起された電子が移動し、その後 QD の非輻射で戻ってくる。この場合には蛍光遷移を

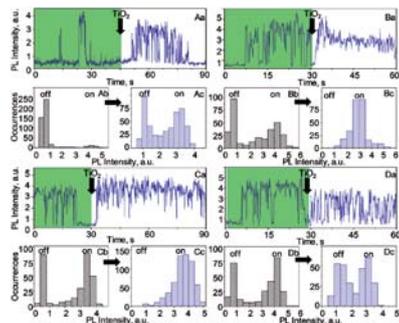


図7：4つの単一 QD の、TiO<sub>2</sub> 粒子添加前後の PL 強度の時間変化

する確率が大きく減少するので、PL 強度が大幅に下がる。このことは、TiO<sub>2</sub> 粒子添加により顕微鏡視野内の多くの QD が光らなくなることで確認されている。図7に示した QD は TiO<sub>2</sub> 粒子添加後長い時間経ったあとでも光っている QD である。blinking がうまく抑制できるのは、QD と TiO<sub>2</sub> 粒子の距離が適当であり、TiO<sub>2</sub> 粒子への電子移動確率が Auger 過程の確率より大きい場合であると考えられる。上述のようなメカニズムは次のような測定でも傍証された。TiO<sub>2</sub> 粒子ではなく、TiO<sub>2</sub> 薄膜の上に分散した QD の blinking 特性を測定すると、図7に示したように改善されることがほとんどなかった。これは、QD と TiO<sub>2</sub> 薄膜が非常に近く、励起された電子はすぐに TiO<sub>2</sub> 薄膜に移動し、戻ってこないためである。

#### (4) 四光波混合法による QD 溶液における新規な溶媒効果の検出

QD の高分子との相互作用による光学特性制御に関連して、QD の光学位相緩和への高分子の影響を調べることを計画していた。その研究過程で、QD の光学位相緩和と励起子吸収線が溶媒の種類により大きく変化することを見出した。現在、その結果を解析して論文としてまとめているところである。

四光波混合(FWM)法の測定では、チタンサファイア再生増幅器で励起された光パラメトリック増幅器(OPA)の出力光の第二高調波を励起光源とし、溶媒に溶かした QD 試料を図3のような配置で励起する。2つの励起光パルスの時間遅延  $\tau$  を変えたときの FWM 信号の緩和から QD の励起子遷移の位相緩和時間を測定する。溶媒として、トルエン、テトラヒドロフラン(THF)、クロロホルムの3種類を用いた。トルエン中の QD の吸収スペクトル、PL スペクトルを図1に示した。図中の破線は励起光のスペクトルである。図で分かるように、QD の第1励起子吸収バンドを励起している。トルエン以外の溶媒中の QD の吸収スペクトル、PL スペクトルは図1とほとんど同じであった。

図8はトルエン、THF 溶液中の QD の第1励起

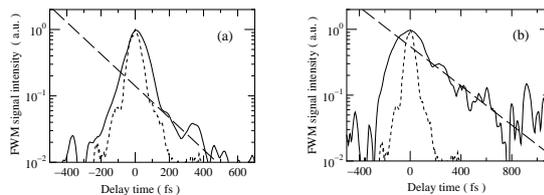


図8：トルエン(a)、THF(b)溶液中の QD に対する FWM 信号 (常温)

子バンドにおける FWM 信号を示している。図中で点線はフェムト秒励起光パルスの自己相関波形で、半値全幅は 72fs であり、パルス幅は約 42fs に対応する。(a)、(b) ともに、 $\tau=0$  近傍の高速の信号と、 $\tau>0$  でゆっくりと減衰する2つの成分からなる。特に、THF 溶液の場合には、この遅い成分の緩和時間が非常に長くなっていることが明瞭に分かる。破線は遅い成分への指数関数フィットで、これから遅い成分の位相緩和時間は、トルエン、THF に対してそれぞれ 720fs、1.2ps と求まる。同じ QD であるにもかかわらず溶媒により位相緩和が大きく変化することを示している。このような QD の位相緩和の溶媒効果が報告された例はなく、非常に新規な効果である。クロロホルム溶液における FWM 信号は更に興味深い振る舞いを示す。図9に示すように、 $\tau<0$  の領域でも指数関数的に成長してくる成分が観測されている。このような成分が生じるのは、溶媒分子による位相変調が速く、励起子の吸収線幅が広くなり、均一的な拡がりになっているためであると考えられる。すでにある理論に従うと、 $\tau<0$  の領域での指数関数フィットから位相緩和時間を求めることができる。この系での位相緩和時間は 240fs と求まり、3つの溶媒の中では最も短くなった。

このような QD の位相緩和の溶媒効果がどのような相互作用によって決まっているかを同定することはできなかった。しかし、QD の励起子遷移の位相緩和が予想以上に顕著な溶媒効果を示すことを初めて検出することができた。

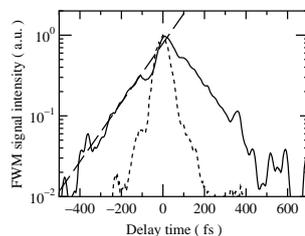


図9：クロロホルム溶液中の QD の FWM 信号

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

① C. Dou, P. Wen, X. Kong, S. Nakanishi,

Q. Feng, The nonlinear refraction sign turned to reverse by intercalating cresyl violet dye into layered titanate nanosheets, *Opt. Commun.* **284** (2010) pp. 1067-1071. 査読有

② K. Goshima, A. Kittaka, K. Fujii, M. Shiraga, N. Tsurumachi, S. Koshiba, S. Nakanishi, H. Akiyama, H. Itoh, Investigation of the confinement potential within GaNAs/GaAs multiple quantum wells, *Phys. Status Solidi C* **8** (2011) pp. 414-416. 査読有

③ T. Kouzai, H. Miyagawa, N. Tsurumachi, S. Koshiba, S. Nakanishi, H. Itoh, Femtosecond Coherent Vibrational Relaxation in PVA Film detected by Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy, *Ultrafast Phenomena XVII* (Oxford University Press, 2010) pp. 251-253. 査読有

④ M. Hamada, S. Nakanishi, T. Itoh, M. Ishikawa, V. Biju, Blinking Suppression in CdSe/ZnS Single Quantum Dots by TiO<sub>2</sub> Nanoparticles, *ACS Nano* **4** (2010) pp. 4445-4454. 査読有

⑤ H. Miyagawa, H. Shiraoka, M. Tani, K. Fujii, N. Takahashi, S. Koshiba, Y. Tanaka, N. Tsurumachi, S. Nakanishi, H. Itoh, Structure and magnetic properties of Gd/Fe layers grown by MBE, *Journal of Crystal Growth* **311** (2009) pp. 2143-2146. 査読有

⑥ R. Kanemoto, A. Anas, Y. Matsumoto, R. Ueji, T. Itoh, Y. Baba, S. Nakanishi, M. Ishikawa, V. Biju, Relations between Dewetting of Polymer Thin Films and Phase-Separation of Encompassed Quantum Dots, *J. Phys. Chem. C* **112** (2008) pp. 8184-8191. 査読有

⑦ Y. Matsumoto, R. Kanemoto, T. Itoh, S. Nakanishi, M. Ishikawa, V. Biju, Photoluminescence Quenching and Intensity Fluctuations of CdSe-ZnS Quantum Dots on an Ag Nanoparticle Film, *J. Phys. Chem. C* **112** (2008) pp. 1345-1350. 査読有

[学会発表] (計 11 件)

①濱田守彦, 鶴町徳昭, 伊藤寛, 中西俊介, 石川満, V. Biju, 「CdSe/ZnS 単一量子ドットの Blinking 特性制御」, 日本物理学会第 66 回年次大会 (2011 年 3 月 25 日, 新潟大学)

②香西浩嘉, 宮川勇人, 鶴町徳昭, 小柴俊, 伊藤寛, 中西俊介, V. Biju, 石川満, 「コロイド状 CdSe/ZnS 量子ドットの位相緩和の溶媒効果」, 日本物理学会第 66 回年次大会 (2011 年 3 月 25 日, 新潟大学)

③ M. Hamada, N. Tsurumachi, S. Nakanishi, T. Itoh, M. Ishikawa, V. Biju, Blinking

control of CdSe/ZnS single quantum dots by electron transfer to TiO<sub>2</sub> nanoparticles, 6th Asian Photochemistry Conference (New Zealand, November 18, 2010).

④ M. Hamada, N. Tsurumachi, H. Itoh, S. Nakanishi, V. Biju, M. Ishikawa, Effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on Blinking of CdSe/ZnS single quantum dots, The 37th International Symposium on Compound Semiconductors (Takamatsu, Japan, June 4, 2010).

⑤香西浩嘉, 宮川勇人, 鶴町徳昭, 小柴俊, 伊藤寛, 中西俊介, V. Biju, 石川満, 「コロイド状 CdSe/ZnS 量子ドットにおける位相緩和の溶媒効果」, 日本物理学会 (2010 年 9 月 24 日, 大阪府立大学)

⑥濱田守彦, 鶴町徳昭, 伊藤寛, 中西俊介, V. Biju, 石川満, 「ナノ粒子による CdSe/ZnS 単一量子ドットの Blinking に対する効果」, 日本物理学会 (2010 年 3 月 21 日, 岡山大学)

⑦ S. Nakanishi, Y. Uchida, H. Tsuji, N. Fujita, K. Fujii, H. Miyagawa, N. Tsurumachi, S. Koshiba, H. Itoh, T. G. Kim, Population Dynamics of Excitons in GaAs/AlAs Coupled Quantum Well Systems Detected by Pump-Probe Spectroscopy, International Conference on Nonlinear Optics (Honolulu, Hawaii, July 12, 2009)

⑧内田祥久, 藤田直也, 藤井健輔, 宮川勇人, 鶴町徳昭, 小柴俊, 伊藤寛, 中西俊介, T. G. Kim, 「結合量子井戸における Pump-Probe 分光」, 日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 28 日, 立教大学)

⑨松本祐介, 山岡洋也, 鶴町徳昭, 伊藤寛, 中西俊介, V. Biju, 伊藤民武, 石川満, 「金属微粒子との相互作用による CdSe 量子ドットの発光特性変化」, 日本物理学会第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 30 日, 立教大学)

⑩中西俊介, 松本祐介, 金本嶺泰, 山岡洋也, V. Biju, 伊藤民武, 石川満, 「CdSe 半導体量子ドットの発光特性制御」, レーザー学会 第 29 回大会 (2009 年 1 月 8 日, 徳島大学)

⑪松本祐介, 山岡洋也, 鶴町徳昭, 小柴俊, 伊藤寛, 中西俊介, 伊藤民武, V. P. Biju, 石川満, 「溶液中での半導体量子ドットと銀粒子間の界面相互作用」, 応用物理学会中国四国支部・日本物理学会四国支部・中国支部 2008 年度講演会 (2008 年 8 月 2 日, 愛媛大学)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中西 俊介 (NAKANISHI SHUNSUKE)

香川大学・工学部・教授

研究者番号 : 30155767