

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03773

研究課題名(和文) 半導体ナノ微粒子複合系のホットキャリア・マルチキャリア移動と荷電励起子の研究

研究課題名(英文) Hotcarrier and Multicarrier Transfer Dynamics and Charged Excitons in Semiconductor Nanocrystal Hybrid Systems

研究代表者

玉井 尚登 (TAMAI, Naoto)

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号：60163664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,410,000円

研究成果の概要(和文)：半導体ナノ微粒子におけるホットキャリア移動と量子閉じ込めの次元性との関係を解明するために、量子ドット(QDs)やナノプレートレット(NPLs)を合成し、これらにAuやPt等のナノ微粒子(NPs)を接合する手法を検討した。Au-CdSe QDsでは1P(e)からホット電子移動が起こっているが、NPLsでは効率的なフォノン放出による高励起状態からの緩和が早くホットキャリア移動が起こらないが、Pt NPs-CdSe NPLsではパルス幅(~60 fs)よりも早い超高速電子移動が存在している事を明らかにした。またQDsやNPLsに光化学電子ドーピングを行い、荷電励起子の振る舞いを解明した。

研究成果の概要(英文)：For understanding the quantum confinement effects on hot carrier transfer, we synthesized several kinds of semiconductor quantum dots (QDs) and nanoplatelets (NPLs) by a colloidal synthetic method, and Au and Pt metal nanoparticles (NPs) were attached on the surface of semiconductor nanocrystals. We found that hot carrier transfer takes place from 1P(e) state in Au-CdSe QDs, whereas no hot carrier transfer was detected in Au and Pt-CdSe NPLs even though the ultrafast carrier transfer faster than the instrument response function (~60 fs) exists in Pt-CdSe NPLs. This difference between QDs and NPLs can be interpreted in terms of very efficient and ultrafast phonon emission from higher excited states of CdSe NPLs and phonon bottle neck in CdSe QDs. Charged excitons in CdSe QDs and NPLs were also examined by photochemical electron doping to QDs and NPLs.

研究分野：光物理化学

キーワード：半導体ナノ微粒子 荷電励起子 ホットキャリア マルチキャリア 過渡吸収分光

1. 研究開始当初の背景

コロイド合成した半導体ナノ微粒子は、種々の形状やサイズ制御が可能で、新規物性を発現する可能性を秘めており近年大きな注目を浴びている。半導体ナノ微粒子は、バルク半導体と異なり、マルチキャリア同士の相互作用によるオージェ再結合が起こり易く、また一つの光子で複数の励起子が生成するキャリア増幅等の性質を持つ。またこれらの現象は、ナノ微粒子の電子構造、形状やサイズ、キャリアの電荷分離、表面状態などによって大きく影響を受ける可能性がある。

我々は、コロイド合成方法により種々の半導体量子ドット (QDs) やナノロッド (NRs)、ナノプレートレット (NPLs)、およびこれらと貴金属ナノ微粒子との複合体等を合成し、その光物性を時間分解レーザー分光や顕微分光により解析してきた。特に Au ナノ微粒子を接合した CdSe NRs では、CdSe の高励起状態から Au へのホットキャリア移動を初めて観測した。ホットキャリア移動やキャリア増幅を有効利用すると、従来の Si 太陽電池の Shockley-Queisser (S-Q) 限界や色素増感太陽電池の一光子吸収—電子移動を超えた高効率な光エネルギー変換に結び付けることが出来るので、その素過程解明は非常に重要である。さらに、生成したホットキャリアやマルチキャリアをオージェ再結合が起こる前に効率よく貴金属ナノ微粒子や他の半導体にキャリア移動させる事が出来れば、S-Q 限界を超えた高効率な光エネルギー変換の手法開発につながる。

一方、キャリア移動が起こり、その微粒子を再び励起すれば、トリオンなどの荷電励起子が生成する。トリオンは、QDs の単一微粒子分光で観測される発光明滅現象において OFF 状態に関与すると考えられているが、そのスペクトルや寿命が明らかになっている例は極めて少ない。また、結合エネルギー等も殆ど研究されていない。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では、まず量子閉じ込めの次元性や形状、サイズを制御した半導体ナノ微粒子、コア-シェル系、および貴金属ナノ微粒子を接合したナノ微粒子複合体を合成する。さらに、これらのナノ微粒子複合体に特徴的な高励起状態からのホットキャリア移動やマルチキャリア移動などの素過程、およびキャリア移動で生成した半導体ナノ微粒子イオンを再び励起することによって生成するトリオン等の荷電励起子の光特性を、可視～近赤外フェムト秒ポンプ-プローブ分光、ピコ秒発光分光、単一微粒子分光で解明する事を一つの目的とする。さらに、貴金属ナノ微粒子を接合した半導体ナノ微粒子複合体の構造や量子閉じ込めの次元性と、これらのキャリア移動素過程、荷電励起子との相関も明らかにする。

この様な研究は、基礎研究として重要なだけ

でなく、キャリアの有効利用と言う観点から、光電変換材料への応用においても重要な基盤となると考えられる。

3. 研究の方法

半導体ナノ微粒子の合成は、溶液中で高温加熱を必要とするホットソープ法、いわゆるコロイド合成法を用いて行う。ナノ微粒子の形状制御には、保護剤が重要な役割を果たす事が知られているので、種々の保護剤を用いながら主に CdX (X = S, Se, Te) などの II-VI 族化合物半導体に焦点を当て、ナノサイズの形状とサイズ制御を行う。さらに、貴金属の前駆体を半導体ナノ微粒子溶液に還元剤と共に加えて貴金属ナノ微粒子を生成させることにより、半導体-貴金属複合ナノ微粒子を合成する。半導体ナノ微粒子が、貴金属イオンの還元体として作用し、表面をエッチングしながら貴金属ナノ微粒子の接合が進行する場合もある。

合成した半導体ナノ微粒子の形状観察と元素組成は、高分解能電子顕微鏡 (HRTEM) とエネルギー分散型 X 線分析 (EDX) を用いて行う。貴金属ナノ微粒子を接合した複合体では、エッチング等の可能性もあるので HRTEM 観察が必要となる。組成分析は、場合により誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS) を用いて解析を行う。

これらの半導体ナノ微粒子および半導体-貴金属複合ナノ微粒子の励起子緩和素過程およびキャリア移動ダイナミクスは、ピコ秒発光分光およびフェムト秒状態選択過渡吸収分光を利用する。励起波長は OPA を用いて可変とし励起直後の電子状態を特定して、プローブにフェムト秒白色光を用いてその後の緩和過程の詳細を解析するものである。またバンド端のブリーチ収率およびバンド端ダイナミクスの立ち上がり寿命から、ホットキャリア移動の時定数およびその電子状態を判定する事が出来る。

4. 研究成果

(1) 貴金属ナノ微粒子接合 CdSe ナノプレートレットのキャリア移動ダイナミクス
CdSe NPLs にプラズモン増強電場を持つ Au や Pt ナノ微粒子の接合と接合数を制御する方法論を研究した。前駆体濃度や温度をパラメータとし試行実験を重ねたが、サイズの大きなナノ微粒子接合系を安定に合成する事は難しく、直ぐに凝集を起こした。しかし 2 nm 程

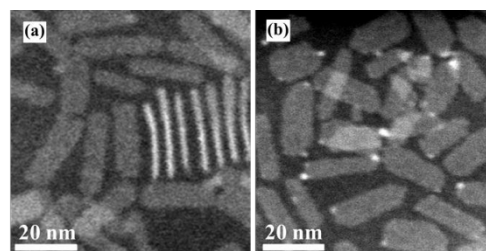


図 1. CdSe NPLs (a) と CdSe NPLs-Au 複合ナノ微粒子 (b) の TEM 像

度のナノ微粒子の接合数制御は可能となった。
① CdSe NPLs のトルエン分散液に Au 前駆体溶液を加えて CdSe-Au 複合ナノ微粒子を合成した。合成した CdSe NPLs と CdSe-Au HNs の TEM 像を図 1 に示す。CdSe NPLs は 20.8×5.7 nm であり、複合ナノ微粒子では Au NPs の粒径が 1.1 ± 0.2 nm であった。CdSe-Au HNs では励起子発光の顕著な消光が観測された。これは CdSe NPLs から Au NPs へのキャリア移動によるものと考えられる。

CdSe NPLs の可視および近赤外領域の過渡吸収スペクトルピークは、伝導帯に励起された電子の寄与が支配的であることが明らかになった。CdSe NPLs と CdSe-Au HNs における heavy-hole 由来のブリーチピークのダイナミクスを図 2 に示す。

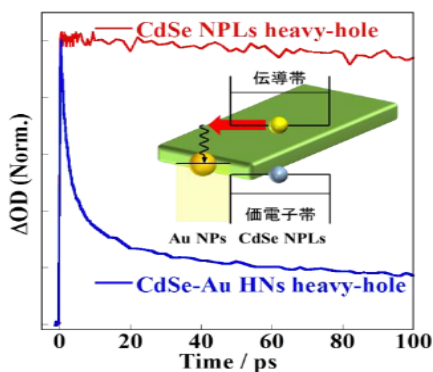


図 2. CdSe NPLs と CdSe-Au HNs の heavy-hole 由来のブリーチダイナミクス

CdSe-Au HNs では、CdSe NPLs から Au NPs への電子移動に由来すると考えられる 1 ps 程度の早い緩和成分が観測された。また、CdSe NPLs と CdSe-Au HNs における heavy-hole 由来のブリーチピークのライズ成分と収率の比較から、CdSe NPLs から Au NPs へのホット電子移動は起こっていないことが示唆された。一方、Au NPs を接合した 2 次元量子閉じ込めの CdSe NRs では、バンド端状態間の遷移に対応するブリーチの立ち上がり成分と収率の比較から、ホット電子移動が観測されている。CdSe NPLs では量子閉じ込めが 1 次元方向のみであり、この系でホット電子移動が観測されなかったのは、量子閉じ込めの減少に伴い CdSe NPLs の高励起状態と Au NPs の電子状態とのカップリングが小さくなったためであると考えられる。

② CdSe ナノプレート (NPLs) に 2 nm 程度の白金ナノ微粒子を接合すると共に、接合数制御した NPLs-Pt 系を用い、フェムト秒状態選択励起過渡吸収分光を行った。その結果、CdSe NPLs の heavy-hole バンドより長波長を励起しても、heavy-hole バンドのブリーチと CdSe NPLs から白金への電子移動に伴うサブピコ秒のブリーチ回復が観測された。また、NPLs を高密度励起しマルチキャリアを生成させても白金ナノ微粒子への素早い電子移動が観測され、NPLs-Pt 系では容易にマルチキャリア移動が起こることを見出した。

Pt 接合により、吸収スペクトルは NPLs の

heavy-hole (HH) および light-hole (LH) からの遷移に対応するピークが観測されるが、長波長に裾が観測された。発光スペクトルにおいては、NPLs で観測されていたバンド端発光の 99%以上の消光が観測された (図 3)。

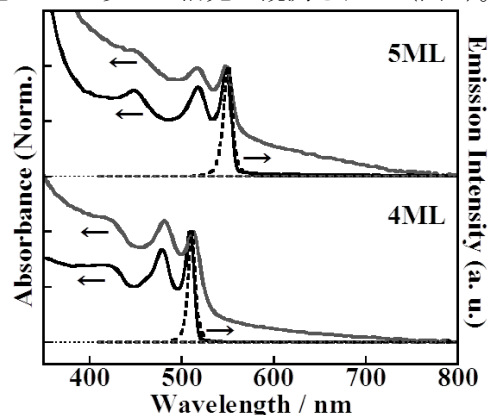


図 3. CdSe NPLs (黒色) および CdSe-Pt HNs (灰色) の吸収 (実線) と発光スペクトル (破線) (下: 4ML, 上: 5ML)

4ML の CdSe-Pt HNs における 400 nm, 510 nm および 570 nm 励起のフェムト秒過渡吸収スペクトル測定の結果、各励起波長での HH におけるダイナミクスにおいて、速い減衰成分が励起モードにかかわらず観測された。この速い減衰 (~ 400 fs) は CdSe NPLs のバンド端から Pt NPs への電子移動と考えられる。400 nm 励起における CdSe-Pt HNs の HH ダイナミクス (図 4) の立ち上がりは NPLs のみとほぼ同じであるが、時間分解能の観点から高励起状態からのホット電子移動に関する議論は難しい。しかし、Pt 接合により、400 nm 励起と 510 nm 励起のどちらにおいても HH のブリーチ吸収が小さくなっていることから、パルス応答関数よりも非常に速い電子移動がバンド端から生じていると考えられる。また、Pt NPs の LSPR バンドの裾を励起しても CdSe NPLs の HH のブリーチがパルス幅で立ち上がり、他の励起波長とほぼ同じ減衰時間であることから、Pt NPs と CdSe NPLs は強くカップリングしていると考えられる。5ML の CdSe-Pt HNs においても 4ML と同様な結果が観測された。

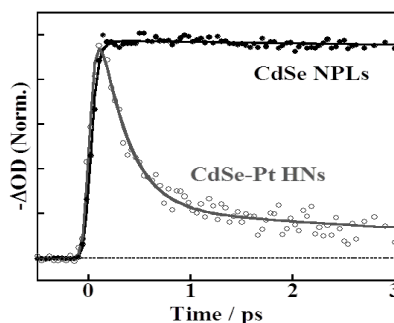


図 4. CdSe NPLs (黒色) および CdSe-Pt HNs (灰色) の 400 nm 励起での heavy-hole におけるダイナミクス

(2) 貴金属ナノ微粒子接合 CdSe QDs のキャリア移動ダイナミクス

量子閉じ込めの次元性効果を解明するために、CdSe 量子ドット (QDs) にも異なったサイズの Au ナノ粒子を接合した複合ナノ微粒子を合成した。各々 CdSe QD-Au HN A, CdSe QD-Au HN B とした。CdSe QD-Au HN には CdSe QDs 由来のバンド端発光の顕著な消光が観測された。CdSe QDs のエネルギー準位と Au のフェルミ準位の関係より CdSe QDs から Au NPs への電荷移動が起こっていると考えられる。

各試料の 1S ブリーチピークにおける過渡吸収ダイナミクス、および 1S ブリーチ収率を図 5 に示す。CdSe QD-Au HN の 1S ブリーチダイナミクスには、電子移動に対応すると考えられる 1 ps 以内の速い緩和成分が観測された。1S ブリーチのライズ成分および 1S ブリーチの収率から、CdSe QDs の高励起状態から Au NPs へのホット電子移動が起こっていることがわかる。

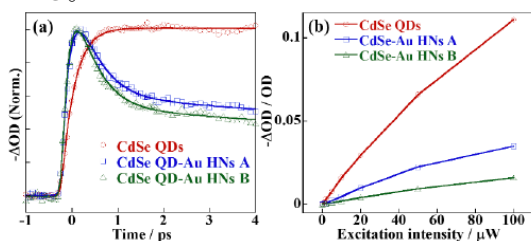


図 5. 励起波長 400 nm での (a) 各サンプルの 1S ブリーチにおける過渡吸収ダイナミクス、および (b) 1S ブリーチの収率

OPA を用いたフェムト秒状態選択過渡吸収分光の解析から、CdSe QDs-Au NPs 系では、① 1P(e) からホット電子移動が起こっている事、② バンド端 1S(e) からは、サブピコ秒の電子移動以外にパルス幅 (~ 60 fs) よりも速い超高速電子移動が存在している事、を明らかにした。

(3) 半導体ナノ微粒子の光化学電子ドーピング

オージェイオン化が発生した後、生成した電荷と新たな励起子が相互作用し、準粒子トリオン (図 6) が形成されることが報告されているが、電荷をもった半導体ナノ粒子の光物性や、トリオンの光学的・物理的性質、およびそのオージェ再結合、閉じ込め次元依存性についてはいまだ研究例が少ない。本研究では CdSe QDs と NPLs を合成し、これに対して正孔捕捉剤を用いて光化学電子ドーピングを行い、負に荷電した半導体ナノ粒子を作製する

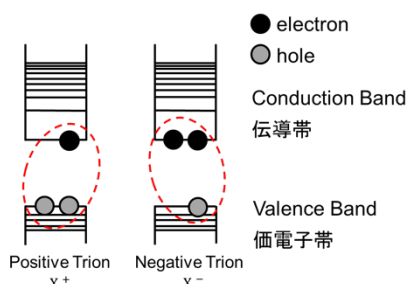


図 6. 正負トリオンのイメージ

と共に、その光物性を評価した。

光化学電子ドーピングは、窒素雰囲気化において脱水脱酸素トルエン中で正孔捕捉剤として $Li[Et_3BH]/THF$ 溶液を半導体ナノ粒子溶液に加え、光励起により還元反応を進行させた。電荷を付与された半導体ナノ粒子は酸素に曝露されることで酸化され、中性状態に戻ることが報告されている。これを確認する為に、光化学電子ドーピング後にサンプル溶液に対して酸素をバブリングし酸化を進行させた。

CdSe QDs ではドーピングにより発光スペクトルは励起子発光が最大で 3 倍になるなど著しい発光増強が観測された。さらに正孔捕捉剤を加えると消光が見られ、発光量子収率が減少すると共に励起子吸収ピークのレッドシフトとブリーチングが観測された。これは伝導帯に注入された電子によって生成したトリオンに由来するものと考えられる。励起子発光の寿命測定では、早い減衰が発光増強に伴い減少し、消光に伴い再び観測された。発光増強の時、励起子発光に対する欠陥発光の比率が正孔捕捉剤の添加量に対して減少しており、正孔捕捉剤によって欠陥サイトが保護されているものと考えられる。

一方、CdSe NPLs においては光化学電子ドーピングに伴い吸収・発光ピークの大きなシフトが観測された (図 7)。TEM 像においてサイズ・形状変化が観測されなかったことから、これらのスペクトル変化は物理的な形状変化に伴う量子閉じ込め状態の変化ではない。CdSe NPLs に対して正孔捕捉剤が 4000 当量を超えたところから大きなスペクトル形状の変化が観測された。量子井戸構造の InGaAs では、電場効果によってスペクトルの長波長シフトが観測されており、CdSe NPLs のスペクトル変化も光化学電子ドーピングによって注入された電子に起因した電場が寄与している可能性がある。

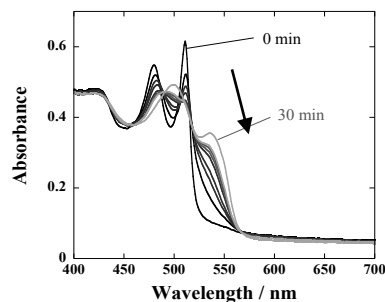


図 7. 4ML の CdSe NPLs に対し正孔捕捉剤の添加量を 4000 当量加えたサンプルの吸収スペクトルの照射時間依存性 (473 nm 励起)

(4) CdSe NPLs の電場効果

分子や分子集合体の吸収や発光に及ぼす外部電場効果は、電子構造や励起状態の緩和・反応機構を解析する上で重要な手法であり、フラレンやポルフィリン、その連結化合物などの機能性分子だけでなく、半導体 QDs に対しても研究が行われてきた。その結果、1S 励起子の生成に伴う双極子モーメントの増加

や発光の電場消光だけでなく、禁制バンドの存在やその電場応答が明らかになった。CdSe NPLs の吸収に及ぼす電場効果に関して、QDs に比べて 10 倍程度大きな効果を有する事が最近報告されたが、双極子モーメント (μ) や分極率 (α) の変化は解析されていない。本研究では CdSe NPLs の電場吸収・電場発光と発光寿命の電場効果を定量的に解析し、励起子生成に伴う $\Delta\mu$, $\Delta\alpha$ と隠れたバンドの存在を明らかにした。

CdSe NPLs の光化学電子ドーピングによる吸収・発光スペクトル変化が構造変化によるものではなく、荷電粒子による電場効果であることを実験的に明確にする為に、CdSe NPLs をポリマー薄膜中に分散させ、吸収、発光および発光寿命の電場効果の実験を行った。

CdSe NPLs の電場吸収変化 $\Delta A(\nu)$ は、PMMA 薄膜中の heavy-hole band 近傍の 19570 cm^{-1} に負ピークを持ち、電場強度 (F^2) に対し、 $0.02\text{ MV}^2\text{cm}^{-2}$ 程度の低い値から非線形性を示した。電場発光変化も、同程度の電場強度から非線形性を示した。吸収変化量は $0.02\text{ MV}^2\text{cm}^{-2}$ で 5~6%にも及び、CdSe NPLs が QDs に比べて非常に大きな電場効果を持つことを示している。 $\Delta A(\nu)$ は、吸収スペクトルの 0 次、1 次、2 次微分の和として表され、その解析から励起状態生成に伴う $\Delta\mu$, $\Delta\alpha$ を求めることが出来る。CdSe NPLs/PMMA のスペクトルを 4 バンドに分け、線形領域の電場強度 ($F = 0.1\text{ MVcm}^{-1}$) で測定した電場吸収スペクトルを simulation した。その結果、定常光では heavy-hole や light-hole に比べて強度が弱く、いわば隠れたバンドである G-2 を考慮することにより、電場吸収スペクトルを再現性よく simulation 出来る事がわかった。また、heavy-hole (G-1) と light-hole (G-3) の吸収に伴う $\Delta\mu$, $\Delta\alpha$ と異なり、G-2 は、 $\Delta\mu \approx 0$ であり $\Delta\alpha$ は G-1, G-3 と符号が異なるだけでなく非常に大きな値 ($\Delta\alpha \approx -3.6 \times 10^4 \text{ \AA}^3$) を持つ。G-2 のこの振る舞いは、PbSe QDs で観測された禁制バンドの振る舞い ($\Delta\mu \approx 0$, $\Delta\alpha$ は負) とよく似ており、CdSe NPLs の電子状態を考える上で重要である。

電場発光は、電場による消光過程が観測された。また発光寿命は、電場によって平均寿命が僅かに短くなると共に、初期強度が減少することが分かった。この事は、電場によって励起子が発光状態に緩和するまでに電荷分離することを示唆している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① Li Wang, Kouhei Nonaka, Tomoki Okuhata, Tetsuro Katayama, and Naoto Tamai, “Quasi-Type II Carrier Distribution in CdSe/CdS Core/Shell Quantum Dots with Type I Band Alignment”, *J. Phys. Chem. C*, **122**, 12038–12046 (2018). DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b11684, 査読有
- ② Tetsuro Katayama, Harunobu Suenaga, Tomoki Okuhata, Sadahiro Masuo and Naoto Tamai, “Unravelling the Ultrafast Exciton Relaxation and Hidden Energy State In $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ Nanoparticles”, *J. Phys. Chem. C*, **122**, 5209–5214 (2018). DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b01051, 査読有
- ③ Tatsuya Kameyama, Kouta Sugiura, Yujiro Ishigami, Takahisa Yamamoto, Susumu Kuwabata, Tomoki Okuhata, Naoto Tamai and Tsukasa Torimoto, “Rod-shaped Zn-Ag-In-Te Nanocrystals with Wavelength-Tunable Band-Edge Photoluminescence in the Near-IR Region”, *J. Mater. Chem. C*, **6**, 2034–2042 (2018). DOI: 10.1039/C7TC05624A, 査読有
- ④ Hiroyuki Naiki, Toshihisa Uedao, Li Wang, Naoto Tamai, and Sadahiro Masuo, “Multiphoton Emission Enhancement from a Single Colloidal Quantum Dot Using SiO_2 -Coated Silver Nanoparticles”, *ACS Omega*, **2**, 728–737 (2017). DOI: 10.1021/acsomega.6b00520, 査読有
- ⑤ Shinya Tajima, Yoshiki Kuroshima, Tetsuro Katayama, Naoto Tamai, Kazuki Sada, and Kenji Hirai, “Solid-Solution Coordination Polymers as Precursors for $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S/C}$ Composite Nanowires”, *Eur. J. Inorg. Chem.*, **14**, 2444–2449 (2017). DOI: 10.1002/ejic.201700289, 査読有
- ⑥ L. Wang, T. Sagaguchi, T. Okuhata, M. Tsuboi, and N. Tamai, “Electron and Phonon Dynamics in Hexagonal Pd Nanosheets and Ag/Pd/Ag Sandwich Nanoplates”, *ACS Nano*, **11**, 1180–1188 (2017). DOI: 10.1021/acsnano.6b07082, 査読有
- ⑦ H. Takata, H. Naiki, L. Wang, H. Fujiwara, K. Sasaki, N. Tamai, and S. Masuo, “Detailed Observation of Multiphoton Emission Enhancement from a Single Colloidal Quantum Dot Using a Silver-Coated AFM Tip”, *Nano Lett.*, **16**, 5770–5778 (2016). DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b02479, 査読有
- ⑧ T. Okuhata and N. Tamai, “Face-Dependent Electron Transfer in CdSe Nanoplatelet–Methyl Viologen Complexes”, *J. Phys. Chem. C*, **120**, 17052–17059 (2016). DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b04765, 査読有
- ⑨ L. Wang, Y. Tian, T. Okuhata, and N. Tamai, “Charge Transfer Dynamics and Auger Recombination of CdTe/CdS Core/Shell Quantum Dots”, *J. Phys. Chem. C*, **119**, 17971–17978 (2015). DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b05254, 査読有
- ⑩ T. Funada, T. Hirose, N. Tamai, and H. Yao, “Organic Nanoparticles of Malachite Green with Enhanced Far-red Emission: Size-dependence of Particle Rigidity”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **17**, 11006–11013 (2015). DOI: 10.1039/C5CP00031A, 査読有
- ⑪ T. Okuhata, Y. Kobayashi, Y. Nonoguchi, T.

Kawai, and N. Tamai, “Ultrafast Carrier Transfer and Hot Carrier Dynamics in PbS-Au Hybrid Nanostructures”, *J. Phys. Chem. C*, **119**, 2113–2120 (2015). DOI: 10.1021/jp508406z, 査読有

〔学会発表〕（計 41 件）

招待講演（6 件）

- ① 玉井尚登, “半導体ナノ粒子の多励起子素過程と高速分光“, レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会, 京都, 2018 年 1 月 24 – 26 日
- ② Naoto Tamai, “Carrier Transfer and Energy Transfer Dynamics in Semiconductor Nanocrystals”, The 13th Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience-2017 (KJFP-2017), Inha University, Korea, Incheon, October 27 – 29, 2017.
- ③ Naoto Tamai, “Exciton dynamics of semiconductor nanocrystals and multi-color optical switching of exciton luminescence”, 28th International Conference on Photochemistry (ICP2017), Strasbourg, France, July 16 – 21, 2017.
- ④ N. Tamai, “Exciton Dynamics of Semiconductor Nanocrystals and Multi-Color Optical Switching of their Luminescence Properties”, National Conference on Luminescence and Applications (NCLA 2017), Hyderabad, India, January 9-11, 2017.
- ⑤ N. Tamai, “Ultrafast and Hot Carrier Transfer in Semiconductor Nanocrystals”, EMN meeting on Ultrafast 2016, Melbourne, Australia, October 10-14, 2016.
- ⑥ Naoto Tamai, “Multi-exciton Dynamics and Carrier Transfer in CdTe and CdSe Nanocrystals”, 13th International Conference on the Chemistry of Selenium and Tellurium (岐阜県・長良川コンベンションセンター) 5 月 23~27 日, 2016.

国際学会（12）

国内学会（29）

〔図書〕（計 2 件）

- ① 玉井尚登 (分担執筆), 5.4.1 励起エネルギー移動, 「発光の事典 – 基礎からイメージングまで –」, 木下修一, 太田信廣, 永井健治, 南不二雄 編集, 朝倉書店, pp. 405-418 (2015). ISBN 978-4-254-10262-8
- ② 玉井尚登 (分担執筆), 5.4.5 会合体, 「発光の事典 – 基礎からイメージングまで –」, 木下修一, 太田信廣, 永井健治, 南不二雄編集, 朝倉書店, pp. 429-437 (2015). ISBN 978-4-254-10262-8

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：

発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://sci-tech.ksc.kwansei.ac.jp/~tamai/new/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

玉井 尚登 (TAMAI, Naoto)
関西学院大学・理工学部・教授
研究者番号：60163664

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()