

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K04988

研究課題名(和文)量子ドット増感系の光誘起電荷移動：基板結晶面の電子構造が増感機能に及ぼす効果

研究課題名(英文)Optical absorption in quantum dot systems on single crystal TiO<sub>2</sub>

研究代表者

豊田 太郎 (Toyoda, Taro)

電気通信大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：40217576

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：半導体量子ドット(QD)を適用する太陽電池は新奇な特性を有するため、次世代候補として期待され研究が進行しているが、変換特性は理論値より低い。我々はQD太陽電池の研究から電極基板の差異が変換特性に大きく影響することを見出し、基板面方位の重要性を示唆した。本研究では変換特性に関連する光エネルギー緩和の検討、特に特性に負の要因となる吸着QD/基板ヘテロ界面における無輻射緩和の基板面方位依存性を明らかにし、さらに光誘起電子移動の駆動力評価・過渡応答評価と合わせ変換特性向上に繋がる基盤情報を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

QD太陽電池は、安価で高い変換効率の可能性を有する次世代候補として多くの研究が進行している。しかし未だ理論値には到達してはいない。本研究では、光誘起電子移動に伴う光エネルギー緩和、特に変換効率低下の要因(入射光エネルギー損失)となる吸着QD/基板ヘテロ界面における無輻射緩和を解明して変換効率向上に繋げる。現在無輻射緩和は重要な因子であるにも拘わらず十分には解明出来ていない。本研究の特長として、無輻射緩和評価として通常の吸光度(Abs)法に加え光音響(PA)法を同時適用する。同時適用することにより、無輻射緩和に伴う熱発生を正確に評価することを可能とし、無輻射緩和の本質的評価を可能とした。

研究成果の概要(英文)：Semiconductor quantum-dots (QD) have desirable characteristics for solar-cells. Despite the potential advantages, no major advance in the in the efficiency of QD-sensitized solar cells has yet been reported. The present study focuses on attention to the exponential optical absorption edge (Urbach-tail) in QD-ligand systems with different QD spacing adsorbed on rutile-TiO<sub>2</sub> substrates with different crystal orientations. Photoacoustic (PA) and absorbance (Abs) spectroscopies were applied to determine the optical absorption and nonradiative relaxation properties. There is a discrepancy between the PA and Abs spectra in the Urbach-tail region. Characterization of the Urbach-tail and heat generated by nonradiative relaxation of QD-ligand systems by PA and Abs spectroscopies showed that the characteristics depend on strongly on the crystal orientations of the rutile-TiO<sub>2</sub> substrate, the QD spacing, and the free energy change.

研究分野：半導体光物性

キーワード：半導体量子ドット 酸化チタン 硫化鉛 光音響分光法 光電子収量分光法 無輻射緩和 自由エネルギー イオン化エネルギー

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

半導体量子ドット(QD)はバルク系に比べて、光吸収係数の増大、電荷分離が大、粒径変化による光吸収量域の可変性、複数個の励起子形成(多重励起子生成)が可能という特徴がある。QDの適用により上記の特性が発揮出来れば太陽電池の高効率化が可能となるため、次世代太陽電池として期待され研究が進行している。しかしいまだ変換効率は低い。現在 QD 太陽電池では変換効率 12%(PbS QD 系)が報告されているが、理論値(~42%)よりは低い。最大要因として、QD と電極基板とのヘテロ界面情報の理解不足がある。そのため、光吸収後のエネルギー緩和、特に変換効率を低下させる無輻射緩和(熱失活)の評価は重要であるにも拘わらず、十分に解明されてはこなかった。ここで基板上の光誘起電子の無輻射緩和の評価には直接的検討が難しく、メカニズムの解明は不十分な状況にあった。

我々は異なるモルフォロジーを持つ電極基板の効果を中心に QD 太陽電池の研究を行った。その結果、低次元性による短絡電流の向上やフォトリソニック結晶による開放電圧の向上が出現し、基板モルフォロジーが変換効率に強く依存することを見出した。ここで基板モルフォロジーの効果は QD 吸着する基板面方位と関連があると考えられ、無輻射緩和も基板面方位の影響を受ける。従来 QD 太陽電池では電極基板に酸化ナノ粒子多結晶(TiO<sub>2</sub>, ZnO 他)を適用しているため、基板面方位依存性の評価は困難であった。そこでメカニズムを明らかにする目的で、異なる方位を有する酸化単結晶基板に吸着した QD の無輻射緩和の評価が重要となることを確信した。QD 太陽電池の電極基板に単結晶基板を適用した研究は Parkinson らにより長らく研究が進められてきた。しかし彼らは単結晶基板を QD 吸着の理想土台としてのみ捉え、面方位依存性の違いが及ぼす影響に関しては研究を行わず、単一の単結晶上に吸着した QD 活性層の詳細な電気化学評価の精密化を目指したものであった。また Graetzel らのグループでは、ナノメートルサイズの TiO<sub>2</sub> 薄片単結晶(ナノシート)集合体を電極基板とする系が研究された。その結果、(001)面を持つナノシート集合体電極が変換効率向上に有効であることが示された。QD 系ではないが、増感剤として色素を対象とした系について、Maitani らは(001)面ナノシート集合体電極により電子移動速度定数が 10 倍増大することを示した。

## 2. 研究の目的

本研究では、光誘起電子移動に伴う変換効率低下の要因となる、吸着 QD/電極基板(ヘテロ界面)における無輻射緩和を解明し、変換効率向上に繋げることを目的とする。無輻射緩和は QD 太陽電池に重要な因子であるにも関わらず、緩和メカニズムは十分に解明出来てはいなかった。具体的には以下の観点から研究を進める。

一般に半導体デバイスの形成では各種界面や基板結晶面方位が重要となる。QD 太陽電池では吸着面積を増やす目的で、電極基板に酸化ナノ粒子多結晶を適用する(TiO<sub>2</sub>, ZnO 他)。そのため、基板面方位の及ぼす効果の評価は困難であった。そこで本研究では面方位の異なる酸化単結晶基板(TiO<sub>2</sub>)に吸着した PbS QD が無輻射緩和に与える効果について解明する。さらに本研究では PbS QD の粒径を一定にし、長さの異なる配位子(MAA 系)を結合し、PbS QD の吸着間距離を変えた際の光吸収後のエネルギー緩和、特に無輻射緩和の QD 間距離依存性に関して検討する。

無輻射緩和の評価としては通常吸光度(Abs)分光法よるものが一般的であるが、それに加えて光熱変換法の中で代表的な光音響(PA)分光法を適用する。PA 法は光吸収による励起状態にある電子が基底状態に戻る際に放出される熱を周囲媒体の圧力変化(音波)として検出する方法であるが、Abs 法に比べより無輻射緩和を反映すると考えられる本研究の特色として、Abs 法と PA 法における光吸収端下でのスペクトル形状の比較検討から無輻射緩和の本質をより明らかにすることを可能とする

異なる基板面方位に吸着した QD 系の電子状態(基底状態と第一励起状態)を評価する。その評価からイオン化エネルギーの評価を行い、光誘起電子移動の駆動力を導出する。ここでは光電子収量(PY)分光法を適応し、電子移動の駆動力と無輻射緩和との間の基板面方位を明らかにする。PY 法は光電子収量に関して光電子そのものを測定するのではなく、光電子が放出された後、試料を中和するために流れ込んだ電流値を微小電流計で精密に測定するものである。この分光法は広いエネルギー範囲(4 ~ 9 eV)に対応出来ると共に、同一試料に対して、真空でも非真空でも測定出来る利点を有する。ここで実用デバイスを研究する場合は、デバイスの動作環境下(大気や不活性ガス下)における電子状態が問題となってくる。このため、真空でも非真空化でも測定出来る PY 分光法は、紫外光電子分光(UPS)に比べて有効性を示している。

### 3. 研究の方法

**試料作製：**異なる面方位を持つルチル型  $\text{TiO}_2$  ( $\text{R-TiO}_2$ ) ((001), (110), (111)) に対し、QD 太陽電池で典型的に使用する PbS QD の吸着を行う。 $\text{R-TiO}_2$  の格子定数はそれぞれ  $a = b = 0.4594 \text{ nm}$ ,  $c = 0.2959 \text{ nm}$  であり、 $\text{R-TiO}_2$  の粗さはそれぞれ  $0.322 \text{ nm}$ ,  $0.356 \text{ nm}$ ,  $0.394 \text{ nm}$  である。PbS QD は安定性に優れており、小さな有効質量 ( $0.08 m_0$ )、大きな誘電率 (181)、大きなボーア半径 ( $18 \text{ nm}$ ) を示すことから、高効率を示す可能性が示唆されている。PbS QD 間吸着距離を変えるため、3種類の配位子を接合した (3MPA, 6MHA, 16MHDA) 。3種の配位子を接合する PbS QD は layer by layer 法により  $\text{R-TiO}_2$  基板の上に吸着した。2500 回転で 15 秒間コロイド状 PbS QD を  $\text{R-TiO}_2$  に塗布、続いてメタノール中に分散した配位子中に浸漬した。最後に基板をメタノール中で 3 回洗浄を行い、その後乾燥させた。これらの工程を 5 回行った。FTIR 評価から、初期状態 PbS QD 分散系におけるオレイン酸は除去され、3種類の配位子が PbS QD に接合していることを確認した。

**PA 法と Abs 法による光吸収評価：**PA スペクトルはガス・マイクロフォン法により評価を行った。光源としては 300 W キセノンショートアークランプを適用し、分光器により射出した単色光 (分解能  $6 \text{ nm}$ ) は  $77 \text{ Hz}$  で変調した。PA セル内にある試料に変調光が周期的に入射することにより、変調された PA セル内の圧力変動、すなわち音波が検出される。発生した音波は高感度マイクロフォンで検出され、強度と位相はロックインアンプ (時定数  $10 \text{ 秒}$ ) で検出される。測定波長範囲は  $400 \sim 800 \text{ nm}$  ( $1.55 \sim 3.10 \text{ eV}$ ) である。 $77 \text{ Hz}$  の変調条件では、PA 信号の光吸収長が熱拡散長よりも大聞く、飽和現象が起こらないことを確認した。号強度の補正には、カーボンブラックシートの PA 信号を適用した。データは S/N 比の向上のため平均化を施した。PA 法は、光散乱系試料に対して有効、広い領域で光吸収を示す系に有効、入射光の強度を増大することにより S/N 比が向上する等の長所を有する。Abs スペクトルは UV-vis スペクトロメータ (JASCO V-670) を適用し、測定波長範囲は  $400 \sim 800 \text{ nm}$  ( $1.55 \sim 3.10 \text{ eV}$ ) で標準的な光吸収評価を行った。PA, Abs スペクトルは、いずれも室温下で測定を行った。

**PY 法によるイオン化エネルギー評価：**PY スペクトルは BIP-KV201 (分光計器) を適用した。イオン化エネルギーは系から電子を離すのに必要な最小エネルギーとして計測される。測定波長範囲は  $131 \sim 310 \text{ nm}$  ( $4.00 \sim 9.47 \text{ eV}$ ) である。光源には重水素ランプ ( $30 \text{ W}$ ) を適用した。光誘起された正孔によるチャージ・アップを補償するため、バイアス電極には負の電圧 ( $-50 \text{ V}$ ) を印加した。測定は室温・真空中 ( $\sim 4 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ ) で行った。ここで、PbS QD はバルクの半導体と同じ仮定し、光電子収量の  $1/3$  乗はフォトンエネルギー比例するとして解析を行った。光電子収量の  $1/3$  乗の直線領域を外挿し、ベースラインとの交点をイオン化エネルギー (基底状態) とした。続いて真空順位からの第一励起状態を求め、光誘起電子移動の駆動力となる自由エネルギーを導出した。

### 4. 研究成果

**試料作製：**形成された PbS QD の粒径と間隔を評価するため、TEM 観察を行った。その結果粒径は  $\sim 2.0 \text{ nm}$ , TEM 像の 50 点程の像に対して統計処理を行った結果、平均見積もり間隔はそれぞれ  $0.3 \text{ nm}$  (3MPA),  $0.8 \text{ nm}$  (6MHA),  $2.1 \text{ nm}$  (16MHDA) であった。PbS QD 吸着間隔は、対応する配位子の炭素原子数に比例して増加することが示された。

$\text{R-TiO}_2$  における (001), (110), (111) 面における単位胞を比較検討すると、(001) 方向と (110) 方向は類似であるが (111) 方向では原子配列が異なっており、(111) 面上の異方性が示唆される。

**PA 法と Abs 法による光吸収評価：**図 1 に、例として 3MPA を結合した PbS QDs の片対数表示 PA スペクトル ((a) (001), (b) (110), (c) (111)) を示す。(6MHA), (16MHDA) も同様の PA スペクトルが得られた。矢印の位置は第一励起エネルギーに対応し、 $\sim 1.9 \text{ eV}$  を示した。すべての系で基板面方位、配位子には依存せず同様の値を示した。ここで第一励起エネルギーと粒径との関係式を適用し粒径を見積もったところ  $\sim 2.0 \text{ nm}$  となり、TEM 観察と良い一致を示した。

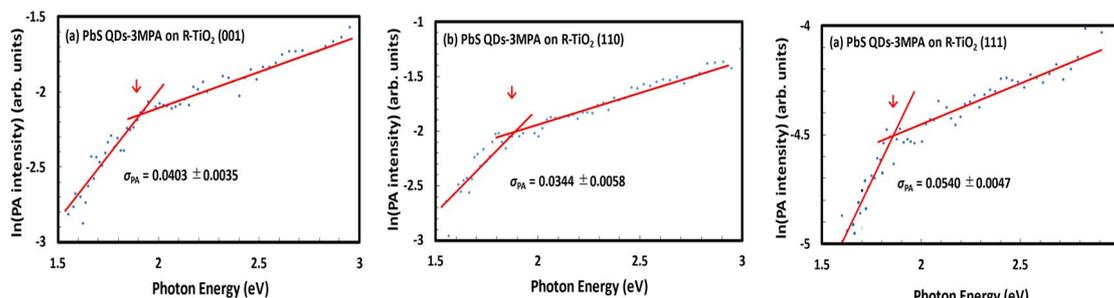


図 1 3MPA を結合した PbS QDs の PA スペクトル (a) (001), (b) (110), (c) (111)

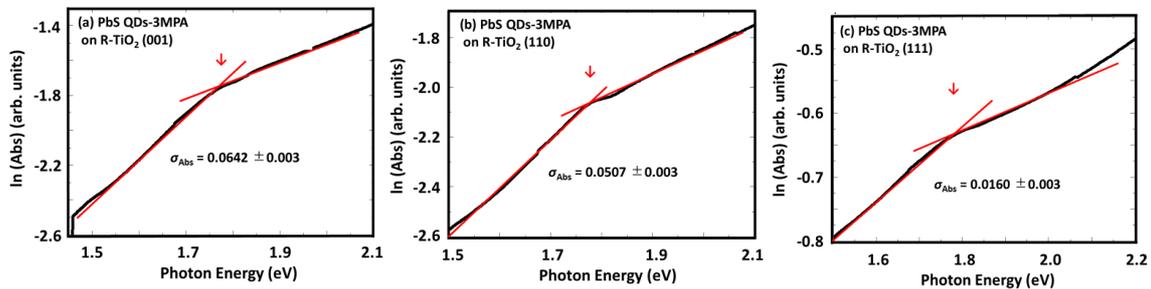


図2 3MPA を結合した PbS QDs の Abs スペクトル (a) (001), (b) (110), (c) (111)

図2に、例として3MPAを結合したPbS QDsの片対数表示Absスペクトル((a) (001), (b) (110), (c) (111))を示す。(6MHA), (16MHDA)も同様のPAスペクトルが得られた。矢印の位置は第一励起エネルギーに対応し、PAスペクトルと同様~1.9 eVを示した。すべての系で基板面方位、配位子には依存せず同様の値を示した。

PA, Absスペクトルは光吸収端下で光子エネルギーの関数として指数関数的に減衰する。発見者の名を取って Urbach 則と呼ばれている。指数関数的効果の特徴出来るパラメータとして、指数関数的変化の傾きを示す勾配係数 $\sigma$  ( $\sigma_{PA}$ ,  $\sigma_{Abs}$ ) が評価の対象になる。このパラメータは結晶の不整合や不純物・欠陥・電子格子相互作用等を反映する。PAが示す $\sigma_{PA}$ の大きさは $\sigma_{Abs}$ のそれより小さい。従来PA法の理論では、両者が一致するはずである。そのことからPA法は不透明の系や散乱の大きな試料に対して有効性が示されている。しかし今回PbS QD系では、無輻射緩和に伴う熱失活が100%という従来PA法の理論とは異なることを示唆している。今回 $\sigma_{Abs}$ に対する $\sigma_{PA}$ の比が、無輻射緩和に伴う熱発生率に比例するという理論を展開し、熱発生率の検討を行い、QD間距離の依存性を検討した。図3に結果を示す。

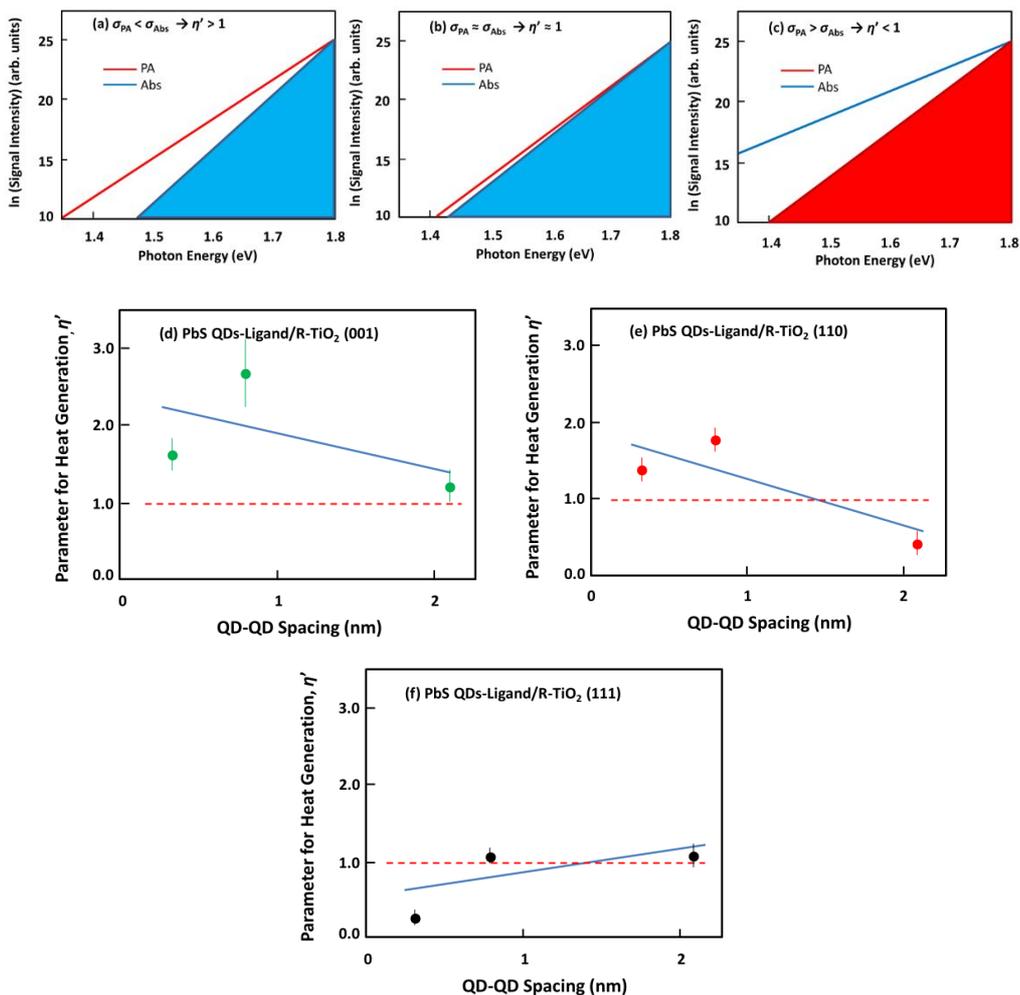


図3 (a), (b), (c) 熱発生率のモデル図 ( $\sigma_{Abs}$  に対する  $\sigma_{PA}$  の比) と熱発生率の QD 間距離依存性 (d) (001), (e) (110), (f) (111)

(001), (110)基板では熱発生率は大きく (1.0 を超えている)、QD 間距離が短いほど大きく、QD 間距離が長くなるに従い熱発生率は減少する。一方 (111)基板では熱発生が小さく(1.0 付近)、(001), (110)基板の場合とは異なり、QD 間距離が短いほど小さく、QD 間距離が長くなるに従い熱発生率はわずかに増加傾向を示す。このような差異は基板結晶方位、配位子、配位子と PbS QD の間の相互作用が関連し、(111)基板面の特異性が示唆される。

PY 法によるイオン化エネルギー評価：

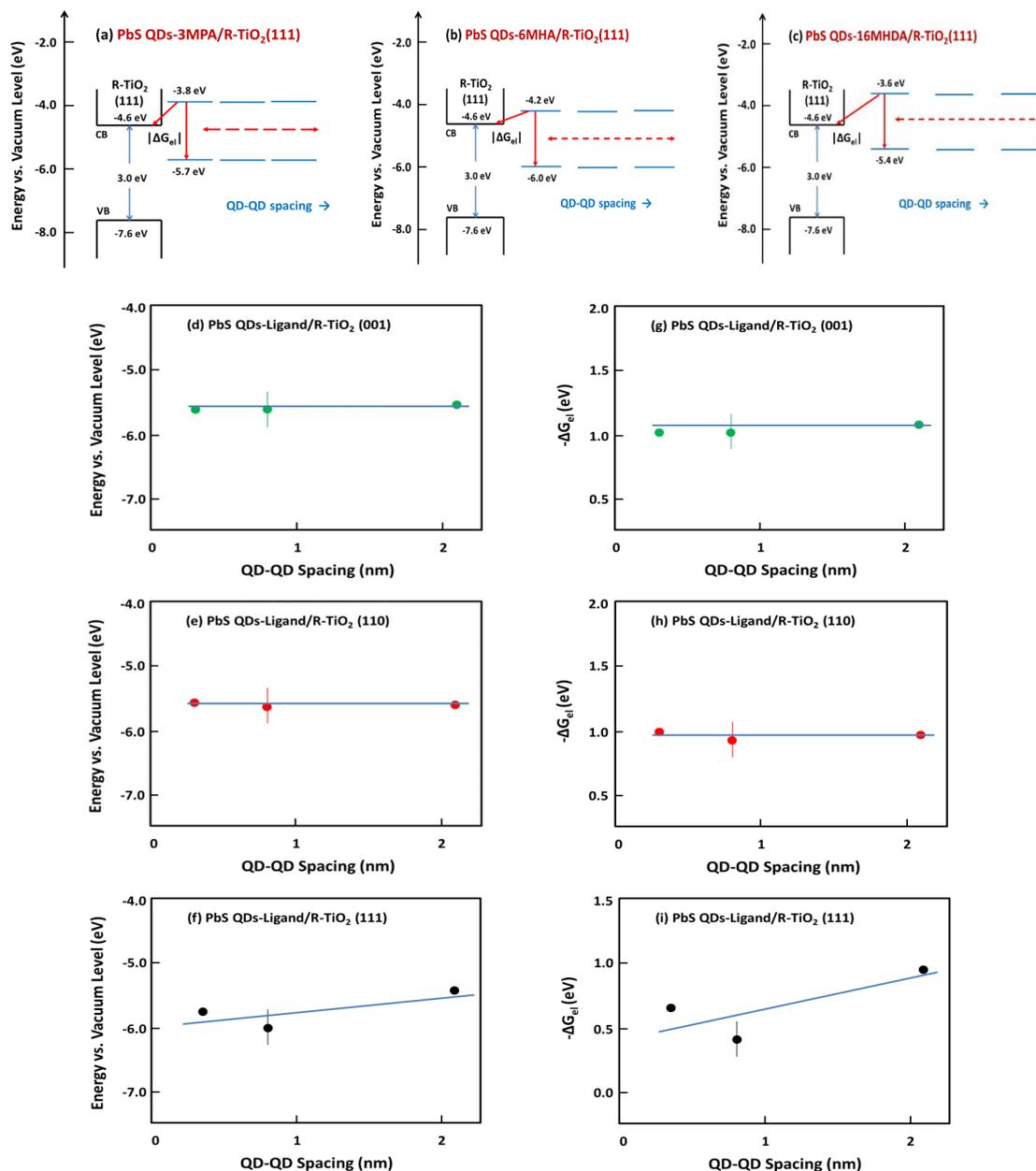


図4 R-TiO<sub>2</sub> と PbS QDs のエネルギー準位の配列 (a) (001), (b) (110), (c) (111)。イオン化エネルギーの QD 間距離依存性 (d) (001), (e) (110), (f) (111)。自由エネルギーの QD 間距離依存性 (g) (001), (h) (110), (i) (111)。

図4に R-TiO<sub>2</sub> と PbS QDs のエネルギー準位の配列、イオン化エネルギーの QD 間距離依存性、自由エネルギーの QD 間距離依存性 (g) (001), (h) (110), (i) (111)を示す。イオン化エネルギーも自由エネルギーも(001), (110)基板では両者はほぼ同じ値を示し、QD 間距離依存性は見られない。(111)基板では QD 間距離依存性を示し増加傾向を示す。このような差異は基板結晶方位、配位子、配位子と PbS QD の間の相互作用が関連し、(111)基板面の特異性が示唆される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 F.Liu, J.Jiang, T.Toyoda, M.A.Kamarudin, S.Hayase, R.Wang, S.Tao, Q.Shen	4. 巻 4
2. 論文標題 Ultra-Halide-Rich Synthesis of Stable Pure Tin-Based Halide Perovskite Quantum Dots: Implications for Photovoltaics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 3958-3968
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.1c00324	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 T.Toyoda, Q.Shen, N.Nakazawa, Y.Yoshihara, K.Kamiyama, S.Hayase	4. 巻 9
2. 論文標題 Exponential Optical Absorption Edge in PbS Quantum Dot-ligand Systems on Single Crystal Rutile-TiO <sub>2</sub> revealed by Photoacoustic and Absorbance Spectroscopies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Research Express	6. 最初と最後の頁 25005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2053-1591/ac4f86	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 Y.Zang, S.Ozu, G.Wu, C.Ding, F.Liu, T.Minemoto, T.Masuda, S.Hayase, T.Toyoda, Q.Shen	4. 巻 124
2. 論文標題 In-depth exploration of the charge dynamics in surface-passivated ZnO nanowires	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 15812-15817
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1024/acs.jpcc.Dc04199	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 F.Liu, J.Jiang, Y.Zhan, C.Ding, T.Toyoda, S.Segawa, S.Hayase, R.Wang, S.Tao, Q.Shwn	4. 巻 59
2. 論文標題 Near-infrared emission from tin-lead (Sn-Pb) alloyed perovskite quantum dots by sodium doping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie-International Edition	6. 最初と最後の頁 8421-8424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.20196020	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 T.Konagai, G.Kapil, Y.Ogomi, K.Yoshino, Q.Shen, T.Toyoda, T.N.Murakami, H.Segawa, S.Hayase	4. 巻 22
2. 論文標題 Hot-injection and ultrasonic irradiation syntheses of Cs <sub>2</sub> Sn <sub>16</sub> quantum dot using Sn long-chain	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nanoparticle Research	6. 最初と最後の頁 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11051-021-05196-3	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 F.Liu, Y.Zhang, C.Ding, K.Kawabata, Y.Yoshihara, T.Toyoda, S.Hayase, T.Minemoto, R.Wang, Q.Shen	4. 巻 32
2. 論文標題 Trioctylphosphine oxide acts as alkahest for SnX <sub>2</sub> /PbX <sub>2</sub> : A general synthetic route to perovskite ASn(x)Pb(1-x)X(3) (A=Cs, FA, MA; x=Cl, Br, I) quantum dots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 1089-1100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemmatter.9b03918	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 F.Liu, Y.Zhang, C.Ding, K.Kawabata, Y.Yoshihara, T.Toyoda, S.Hayase, R.Wang, Q.Shen	4. 巻 32
2. 論文標題 Trioctylphosphin Oxide Acts as Alkahest for SnX <sub>2</sub> /PbX <sub>2</sub> : A General Synthetic Poute to Perovskite ASn <sub>x</sub> Pb <sub>1-x</sub> X <sub>3</sub> (A=Cs,FA,MA; X=Cl,Br,I) Quantum Dots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 1089-1100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssuschemeng	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.Toyoda, Q.Shen, K.Hori, N.Nakazawa, K.Kamiyama, S.Hayase	4. 巻 122
2. 論文標題 Crystal growth, expenential optical absorption edge, and ground state energy level of PbS quantum dots adsorbed on the (001), (110), and (111) surfaces of rutile-TiO <sub>2</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 13590-13599
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b12675	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 T.Toyoda, Q.Shen, M.Hironaka, K.Kamiyama, H.Kobayashi, Y.Hirose, S.Hayase	4. 巻 122
2. 論文標題 Aniwotropic crystal growth, optical absorption, and ground-state energy level of CdSe quantum dots adsorbed on the (001) and (102) surfaces of anatase-TiO <sub>2</sub> : quantum dot-sensitization system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 29200-29209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b07378	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 C.Ding, Y.Zhang, F.Liu, N.Nakazawa, Q.Huang, S.Hayase, Y.Ogomi, T.Toyoda, R.Wang, Q.Shen	4. 巻 10
2. 論文標題 Recombination suppression in PbS quantum dot heterojunction solar cells by energy-level alignment in the quantum dot active layers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 26142-26152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.7b06552	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 N.Nakazawa, Y.Zhang, F.Liu, C.Ding, K.Hori, T.Toyoda, Y.Yao, Y.Zhou, S.Hayase, R.Wang, Z.Zou, Q.Shen	4. 巻 4
2. 論文標題 The interparticle distance limit for multiple exciton dissociation in PbS quantum dot solid films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanoscale Horizons	6. 最初と最後の頁 445-451
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8NN00341F	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 Y.Zhang, G.Wu, C.Ding, F.Liu, Y.Yao, Y.Zhou, C.Wu, N.Nakazawa, Q.Huang, T.Toyoda, R.Wang, S.Hayase, Z.Zou, Q.Shen	4. 巻 9
2. 論文標題 Lead selenide colloidal quantum dot solar cells achieving high open-circuit voltage with one-step deposition strategy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 3598-3603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.8b01514	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 T.Toyoda, Q.Shen, K.Kamiyama, K.Katayama, S.Hayase	4. 巻 121
2. 論文標題 Dependences of the optical absorption, ground state energy level, and interfacial electron dynamics on the size of CdSe quantum dots adsorbed on the (001), (110), and (111) surfaces of single crystal rutile TiO <sub>2</sub>	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 25930-25401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc7b09372	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 Y.Zhang, G.Wu, I.Mora-Sero, C.Ding, F.Liu, Q.Huang, Y.Ogomi, S.Hayase, T.Toyoda, R.Wang, J.Otsuki, Q.Shen	4. 巻 8
2. 論文標題 Improvement of photovoltaic performance of colloidal quantum dot solar cells using organic small molecule as hole-selective layer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 2163-2169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.7b00683	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 T.Toyoda, Q.Shen, K.Hori, N.Nakazawa, K.Kamiyama, S.Hayase	4. 巻 122
2. 論文標題 Crystal growth, exponential optical absorption edge, and ground state energy level of PbS quantum dots adsorbed on the (001), (110), and (111) surfaces of rutile-TiO <sub>2</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 A-J
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b12675	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

〔学会発表〕 計33件(うち招待講演 7件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 小栗直己、丁超、早瀬修二、豊田太郎、沈青
2. 発表標題 PbS/CdS量子ドット薄膜の光励起キャリアダイナミクス
3. 学会等名 2021年第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 矢嶋翔太、丁超、豊田太郎、早瀬修二、沈青
2. 発表標題 CsSnxPb1-xI3ペロブスカイト量子ドットの合成と光物性
3. 学会等名 2021年第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 劉東、李花、李玉勝、丁超、豊田太郎、宮崎康次、早瀬修二、沈青
2. 発表標題 光音響法によるペロブスカイト単結晶の表面再結合と熱物性の研究
3. 学会等名 2022年第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 河田雄仁、小栗直巳、劉等、豊田太郎、早瀬修二、沈青
2. 発表標題 PbS-X(X=I,Br)量子ドット薄膜の光物性と光励起キャリアダイナミクス
3. 学会等名 2022年第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 淵本秋人、丁超、李花、矢嶋翔太、豊田太郎、早瀬修二、増田泰造、沈青
2. 発表標題 無機ハロゲン化ペロブスカイト量子ドットの合成と光物性
3. 学会等名 2022年第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 川畑 健太郎、劉 峰、張 耀紅、沈 青、豊田 太郎、早瀬 修二
2. 発表標題 鈴と鉛の混合比によるCeSnxPb1-xBr3ペロブスカイトナノ結晶の光物性と光励起キャリアダイナミクスの変化
3. 学会等名 2020年第18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 廣谷 太佑、アクマル・カマルディン、西村 滉平、沈 青、豊田 太郎、早瀬 修二
2. 発表標題 スズペロブスカイト太陽電池の開放電圧の開放電圧と内蔵電位
3. 学会等名 2020年第18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 小栗 直己、朝倉 良太、丁 超、早瀬 修二、豊田 太郎、沈 青
2. 発表標題 PbS量子ドット膜の光励起キャリアダイナミクスの粒径依存性
3. 学会等名 2021年第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 矢嶋 翔太、川端 健太郎、劉 峰、張 耀紅、丁 超、豊田 太郎、早瀬 修二、沈 青
2. 発表標題 APbBr3ペロブスカイトナノ結晶の光物性と光励起キャリアダイナミクスおよび安定性
3. 学会等名 2021年第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 T.Toyoda, Q.Shen, M.Hironaka, K.Kamiyama, H.Kobayashi, Y.Hirose, S.Hayase
2. 発表標題 Anisotropic crystal growth, optical absorption, and ground-state energy level of CdSe quantum dots adsorbed on the (001) and (102) surfaces of anatase-TiO <sub>2</sub>
3. 学会等名 7th International Conference & Exhibition on Advanced & Nano Materials
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 豊田太郎、沈 青、神山慶太、早瀬修二
2. 発表標題 異なるTiO <sub>2</sub> 結晶面に吸着した半導体量子ドットの光吸収とUrbach則：光熱変換法と吸光度法による評価
3. 学会等名 2019年光化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.Toyoda, Q.Shen, K.Kamiyama, S.Hayase
2. 発表標題 Crystal growth, exponential optical absorption edge, and ground state energy level of PbS quantum dots on the different surfaces of single crystal rutile-TiO <sub>2</sub>
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 豊田太郎、沈 青、中澤直樹、吉原泰葉、神山慶太、早瀬修二
2. 発表標題 TiO <sub>2</sub> 単結晶基板に吸着した配位子結合PbS量子ドットの光吸収—光音響分光法と吸光度分光法による評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 豊田太郎、沈 青、堀 奏江、中澤直樹、神山慶太、早瀬修二
2. 発表標題 ルチル型TiO <sub>2</sub> 単結晶に吸着したPbS量子ドットの結晶成長と電子構造
3. 学会等名 ナノ学会第16回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Toyoda, Q.Shen, K.Kamiyama, S.hayase
2. 発表標題 Electronic structure of inverse opal and nanoparticulate TiO <sub>2</sub> electrodes
3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 豊田太郎、沈 青、中澤直樹、吉原泰葉、神山慶太、早瀬修二
2. 発表標題 異なるTiO <sub>2</sub> 単結晶面に吸着したPbS量子ドットのUrbach則と基底状態評価—量子ドット間距離依存性
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Toyoda, Q.Shen, K..Kamiyama, S.Hayase
2. 発表標題 Anisotropic crystal growth, optical absorption, and ground state energy level of PbS qauntum dots adsorb ed on the different surface orientations of rutile-TiO <sub>2</sub>
3. 学会等名 4th World Congress on Materials Science & Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Toyoda, Q.Shen, K.Kamiyama, H.Kobayashi, Y.Hirose, S.hayase
2. 発表標題 Anisotropic crystal growth, optical absorption, and ground state energy level of CdSe quantum dots adsorbed on the (001) and (102) surfaces of anatase-TiO <sub>2</sub>
3. 学会等名 International Conference on Applied Physics and Mathematics & World Congress on Materials Research and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Toyoda
2. 発表標題 The appearance of anisotropic optical absorption, ground state energy, and crystal growth of CdSe quantum dots adsorbed on the (001) and (102) surfaces of anatase-TiO <sub>2</sub>
3. 学会等名 5th International Conference on Theoretical, Materials and Condensed Matter Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 豊田太郎、沈 青、神山慶太、早瀬修二
2. 発表標題 異なるTiO <sub>2</sub> 結晶面に吸着した半導体量子ドットの光吸収とUrbach則—光熱変換法と吸光度法による評価
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 豊田太郎、沈 青、中澤直樹、吉原泰葉、神山慶太、早瀬修二
2. 発表標題 TiO <sub>2</sub> 基板上にPbS量子ドット間距離を制御吸着した系の光音響法と光電子収量法による評価：量子ドット増感系
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北畠有紀子、大図修平、丁 超、張 耀紅、早瀬修二、豊田太郎、片山建二、沈 青
2. 発表標題 PbS量子ドット薄膜における光励起キャリアダイナミクスー量子ドットサイズの依存性ー
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.Toyoda, K.Kamiyama, K.Katayama, H.Kobayashi, S.Hayase, Q.Shen
2. 発表標題 Photoinduced electron transfer dynamics of CdSe quantum dots on single crystal rutile-TiO <sub>2</sub> : Dependence on the crystal orientation of the substrate
3. 学会等名 4th World Congress and Expo on Nanotechnology and Materials Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 豊田太郎、沈 青、神山慶太、片山建二、早瀬修二
2. 発表標題 異なるルチル型TiO <sub>2</sub> 単結晶面に吸着したCdSe量子ドットの光吸収・イオン化エネルギー・光誘起電子移動ー基板面方位と粒径依存性
3. 学会等名 ナノ学会第15回大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T.Toyoda, Q.Shen, k.kamiyama, K.Katayama, S.Hayase
2. 発表標題 Size-dependent optical absorption, ground state energy, and interfacial electron transfer dynamics of CdSe quantum dots on single crystal rutile-TiO <sub>2</sub> (001), 8110), and (111) surfaces
3. 学会等名 10th International Symposium on transparent oxide and related materials for electronics and optics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 豊田太郎、沈 青、堀 奏江、神山慶太、早瀬修二
2. 発表標題 ルチル型TiO <sub>2</sub> 単結晶(001), (110), (111)面に吸着したPbS量子ドットの光吸収とイオン化エネルギー
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北島有紀子、丁 超、張 耀紅、豊田太郎、早瀬修二、沈 青
2. 発表標題 PbS量子ドットヘテロ接合型太陽電池における開放電圧の粒径依存性
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T.Toyoda
2. 発表標題 Electronic structure of inverse opal- and nanoparticulate-TiO <sub>2</sub> electrodes
3. 学会等名 3rd International Conference on Teoretical and Condensed Matter Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T.Toyoda
2. 発表標題 Photoinduced interfacial electron transfer dynamics of CdSe quantum dots on single crystal rutile TiO <sub>2</sub> (001), (110), and (111) surfaces
3. 学会等名 3rd International Conference on Teoretical and Condensed Matter Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T.Toyoda, Q.Shen, K. Kamiyama, K.Katayama, S.Hayase
2. 発表標題 Photoinduce interfacial electron transfer dynamics of CdSe quantum dots on the (001), (110), and (111) surfaces of single crystal rutile TiO <sub>2</sub>
3. 学会等名 International Symposium on Novel Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces for Future Earth
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 豊田太郎、沈 青、堀 奏江、中澤直樹、神山慶太、早瀬修二
2. 発表標題 ルチル型TiO <sub>2</sub> 単結晶に吸着したPbS量子ドットの指数関数的光吸収端－光音響法と吸光度法による評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 豊田太郎、沈 青、堀 奏江、中澤直樹、神山慶太、早瀬修二
2. 発表標題 ルチル型TiO <sub>2</sub> 単結晶に吸着したPbS量子ドットの結晶成長と電子状態
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中澤直樹、Zhang Yaohong、堀 奏江、早瀬修二、豊田太郎、沈 青
2. 発表標題 PbS量子ドット膜における多重励起子の電荷分離ダイナミクス
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018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	沈 青  (Shen Qing)  (50282926)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授    (12612)	

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