

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02736

研究課題名(和文)ヘテロ接合型量子ドット太陽電池のナノ界面制御と多重励起子の電荷分離に及ぼす効果

研究課題名(英文) Nano-interface engineering of heterojunction quantum dot solar cells and the effect on charge separation of multiple excitons

研究代表者

沈 青 (Shen, Qing)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：50282926

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：量子ドット(QD)間の距離を十分に制御したQD膜における光励起キャリアダイナミクスを解析し、多重励起子の電荷分離速度定数のQD間距離依存性を見出した。QD間距離をある値より短くすれば、オージェ再結合よりも早く多重励起子が電荷分離できることを明らかにした。これらの発見は、QDの特徴である多重励起子生成(MEG)により励起された多重励起子を光電変換デバイスに利用できることが示唆される。また、PbS QDヘテロ接合型太陽電池の電子輸送層/QD膜界面、QD-QD界面とQD膜/正孔輸送層界面などのナノ界面をパッシベーションすることにより、エネルギー変換効率が世界トップレベルである12.5%に達成できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体量子ドット(QD)を利用した太陽電池(量子ドット太陽電池)は、集光時の理論効率は60%以上ともいわれ、高効率次世代太陽電池として注目されている。量子ドット太陽電池の特徴は、これまで活用できなかった幅広い波長の光吸収を行えること、高いエネルギーの光を熱エネルギーとして損失する前に励起子生成に活用できることである。どちらも従来の太陽電池のボトルネックを解決するものであるが、高いエネルギーの光を活用するには、通常1光子に1つしか取り出せない励起子を複数取り出すことができる多重励起子生成(MEG)の発現が鍵となる。本研究の成果は高効率MEG型太陽電池の設計に有意義な基礎データとなる。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the photoexcited carrier dynamics in QD films with sufficiently controlled different QD-QD distances, and found that the rate constant of charge separation of multiple excitons strongly depends on the QD distance. It was found that by controlling the QD distance shorter than a certain value, multiple excitons can be separated through charge transfer from one QD to the neighboring one because the charge transfer rate is larger than the Auger recombination rate. From our findings, it is suggested that the multiple excitons generation (MEG), which is a key feature of the QDs, can be used for optoelectronic devices such as solar cells. In addition, by passivating the three kinds of interfaces, i.e., the electron transport layer/QD film interface, the QD-QD interface and the QD film/hole transport layer interface in the QD heterojunction solar cells, we have achieved the world's top level of energy conversion efficiency of 12.5% for PbS QD heterojunction solar cells.

研究分野：応用物理

キーワード：量子ドット 多重励起子 太陽電池 電荷分離 ナノ界面 パッシベーション ヘテロ接合 電荷再結合

## 1. 研究開始当初の背景

半導体量子ドット(QD)を利用した太陽電池(量子ドット太陽電池)は、集光時の理論効率は60%以上ともいわれ、高効率次世代太陽電池として注目されている。量子ドット太陽電池の特徴は、これまで活用できなかった幅広い波長の光吸収を行えること、高いエネルギーの光を熱エネルギーとして損失する前に励起子生成に活用できることである[1]。どちらも従来の太陽電池のボトルネックを解決するものであるが、高いエネルギーの光を活用するには、通常1光子に1つしか取り出せない励起子を複数取り出すことができる多重励起子生成(MEG: Multiple Exciton Generation)の発現が鍵となる[1]。従来のバルク半導体ではMEGの効率は極めて小さい。しかし、量子ドットでは、量子閉じ込め効果により、光励起状態の緩和時間が長くなり(ピコ秒からナノ秒の間で起こる)、その結果 MEG効率が大きく上昇することが可能となる。半導体量子ドットのMEG効果を太陽電池へ応用できれば、太陽電池のエネルギー変換効率の著しい向上(集光しない場合は理論限界は44%)が期待される[2]。その中で、安価かつ簡便に作製できるコロイド量子ドットを利用した太陽電池が特に世界的に注目されている。しかし、この系のエネルギー変換効率は申請者らの研究成果を含め最近の3年間で大変向上されたが、まだ10-11%である。最も大きな要因として、①ナノヘテロ接合光機能界面の状態に関する基礎的な理解の不十分によるもの、②最適な電荷分離ナノ界面がまだ形成されていないこと、③多重励起子を外部に取り出し光電流に寄与する手法はまだ確立されていないことなどが挙げられる。

## 2. 研究の目的

申請者は安価に作製できる半導体量子ドットに対して、1個の高エネルギー光子による多重励起子生成(MEG)の発現から消滅までのダイナミクスの観測に成功した。MEG効果を利用できれば、太陽電池の変換効率は著しく向上できること(44%)が理論的に予言された。本研究は、安価・高効率な次世代太陽電池の一つである多重励起子生成型ヘテロ接合量子ドット太陽電池の電荷分離機構の解明とナノ界面制御による高効率化への指針を与えることを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では多重励起子生成(MEG)型ヘテロ接合量子ドット太陽電池の電荷分離機構の解明とナノ界面制御による高効率化への指針を与えることを目的として、以下の研究を行った。(1)ヘテロ接合太陽電池を作製し、各界面(量子ドット/量子ドット界面、電子輸送層/量子ドット界面、量子ドット/正孔輸送層界面)の制御方法を検討する；(2)上記の(1)に対して、時間分解レーザー分光法を用いて多重励起子や光励起キャリアの緩和機構と各界面における電荷分離・再結合プロセスの解明を行う；(3)上記(2)結果を作製条件への還元を通して、多重励起子の電荷分離できるナノ接合界面の構築条件を提案する。

## 4. 研究成果

(1) p型半導体としてPbS QDs、n型半導体として一次元的な構造を有するZnO ナノワイヤ(ZnO NWs: ZnO Nanowires)電極を用いて、ヘテロ接合型量子ドット太陽電池デバイスの作製方法を確立した。PbS QDs/ZnO界面にSnO<sub>2</sub>パッシベーションを行い、ヘテロ接合太陽電池における光電変換特性の変化について検討した。ZnO NWs電極におけるフォトルミネッセンスのスペクトルから、酸素空孔由来と考えられる深い準位の欠陥による発光が2.0-2.4 eVで観測された(図1)。SnO<sub>2</sub>パッシベーションを施すことで、深い準位の欠陥による発光が抑制されることが判明した(図1)。また、SnO<sub>2</sub>界面パッシベーションによって短絡電流密度J<sub>sc</sub>、開放電圧V<sub>oc</sub>、曲線因子FFが向上し、光電変換効率は1.4倍に増加したことが分かった。これは、NWs電極における伝導帯最下端の上昇に伴う擬フェルミ準位の上昇と深い準位の欠陥が減少したことによる欠陥を介した再結合の抑制が要因の一つとして推測される。これらの結果より、PbSQDs/ZnONWsヘテロ接合太陽電池におけるSnO<sub>2</sub>界面パッシベーションが、光電変換効率の向上に有用であることが分かった。本研究成果をまとめた論文が英文雑誌(*Front. Energy Res.*, 2019, 7, 11. DOI: [10.3389/fenrg.2019.00011](https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00011))に掲載された。

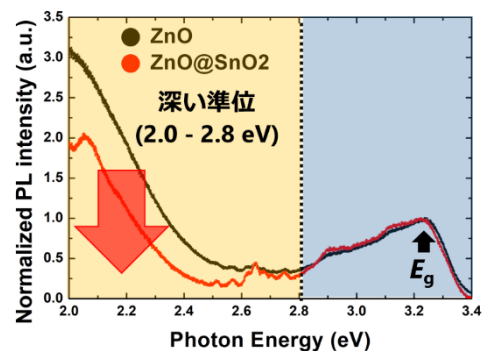


図1 ZnO ナノワイヤ表面におけるSnO<sub>2</sub>パッシベーションによるフォトルミネッセンス(PL)スペクトルの変化

(2)異なる粒径におけるPbS量子ドットの吸収スペクトルから、量子ドットにおける欠陥量、

結晶性などを反映するアーバックエネルギー(Eu)を算出することで、粒径変化による Eu 値が開放電圧損失に与える影響を検討した。その結果、粒径増加により Eu 値は 70meV から 25 meV まで減少することが判明した。FTO/ZnONW/PbS QD 薄膜を電池化した際の光電変換特性から開放電圧損失を算出した結果、粒径が増加するほど 1.30 eV から 0.80 eV まで損失が減少しており、薄膜の結晶性が良いほど開放電圧の損失が小さくなるということが一つの可能性として示唆された。

(3) 量子ドット (QD) 膜における多重励起子の電荷分離の速度定数の QD 間距離の依存性について検討した。メルカプトアルカン酸 (MAA) である mercaptopropionic acid (3-MPA), mercaptohexanic acid (6-MHA)、mercaptohexanic acid (12-MDA)、mercaptohexadecanoic acid (16-MHDA) の 4 種類の配位子を PbS QD 表面に配位させることで、QD 間距離のみが異なる QD

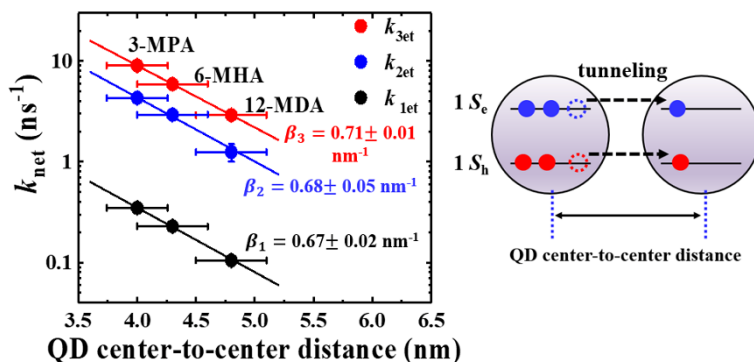


図2 QD 膜における単一励起子、2 励起子、3 励起子の電荷分離が隣接する QD 間でのトンネル効果により行い、その速度定数  $k_{net}$  が QD 間距離の減少に伴い指数関数的に増加する。

膜を作製することができた。QD 間距離はそれぞれ  $0.3(\pm 0.2)$  nm,  $0.8(\pm 0.4)$  nm,  $1.4(\pm 0.4)$  nm,  $2.1(\pm 0.4)$  nm であった。高速過渡吸収 (TA) 分光法を用いて、QD 膜の多重励起子の緩和ダイナミクスについて系統的に調べた。その結果、QD 膜における単一励起子、2 励起子、3 励起子の電荷分離が隣接する QD 間でのトンネル効果により行い、その速度定数  $k_{et}$  が QD 間距離の減少に伴い指数関数的に増加することを見出した。さらに重要なのは、QD の中心間距離が 4.3 nm 未満 (または QD-QD 間隔が 0.8 nm 未満) である場合、オージェ再結合が発生する前に多重励起子が抽出できることが判明した。この結果は、なぜこれまでに短い表面配位子で処理された QD 太陽電池のみから 100% を超える光電流量子収率 (IPCE) が観察された理由を明らかにした。私たちの発見は、QD の特徴である MEG を太陽電池などの光デバイスに利用するための重要な条件を見つけた。本研究成果をまとめた論文が英文雑誌 (*Nanoscale Horizons*, 2019, 4, 445-451. DOI: 10.1039/C8NH00341F.) に掲載された。

(4) コロイド量子ドット (CQD) の膜における QD 表面パッシベーションは膜の各種物性、特に QD 間での単一励起子と多重励起子の電荷分離、および量子ドット太陽電池の光電変換特性に大きい影響を与えることが予想できる。本年度では、PbS QD 表面パッシベーションに 4 種類のヨウ化物塩、すなわち酸性度が高いヨウ化メチルアンモニウム (MAI) とヨウ化アンモニウム (NH4I) と酸性度が低いヨウ化テトラブチルアンモニウムヨージド (TBAI) と 1-エチル 3-メチルイミダゾリウムヨージド (EMII) を適用した。これらのヨウ化物塩の酸性度の違いによる各種特性の変化とそのメカニズムについて研究した。PbS CQD 太陽電池の光電変換特性の評価、過渡吸収 (TA) 法とマイクロ波光伝導測定法 ( $\mu$ -PCD) 法による PbS CQDs 膜の光励起キャリアダイナミクスの評価、光音響法 (PAS) による光吸収スペクトルの測定、そして XPS による PbS CQDs 表面の元素分析を行った。まず、酸性度が高いヨウ化物塩で処理した PbS QDs 膜ほど、電荷分離確率が減少することが分かった。次に、MAI 及び NH4I で処理した CQD 膜におけるキャリア寿命時間は EMII 及び TBAI で処理した CQD 膜のキャリア寿命時間の 1/3 倍程度になった。有効キャリア寿命の値の減少は再結合確率の増加を示すものである。また、塩の酸性度の高いほど、PbS QDs 膜のアーバックエネルギーは高くなったことから高酸性度のヨウ化物塩は PbS CQDs 薄膜に欠陥の形成が示唆される。さらに、酸性度が高いヨウ化物塩のデバイスの光電変換効率は酸性度が低いものの光電変換効率と比較して、変換効率が 4% 程低くなった。これらの原因としては、酸性度の高い陽子を持つ MAI 及び NH4I で配位子置換を際に PbS CQDs 表面の Pb 原子が量子ドット表面から除去されたことが考えられる。

<引用文献>

- ① A. J. Nozik, *Physica E* **14**, 115 (2002); ② M. C. Beard et al, *Acc. Chem. Res.* **46**, 1252 (2013).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計26件（うち査読付論文 26件／うち国際共著 24件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ozu Shuhei, Zhang Yaohong, Yasuda Hironobu, Kitabatake Yukiko, Toyoda Taro, Hirata Masayuki, Yoshino Kenji, Katayama Kenji, Hayase Shuzi, Wang Ruixiang, Shen Qing	4. 巻 7
2. 論文標題 Improving Photovoltaic Performance of ZnO Nanowires Based Colloidal Quantum Dot Solar Cells via SnO <sub>2</sub> Passivation Strategy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Energy Research	6. 最初と最後の頁 30-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fenrg.2019.00011	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 Liu Feng, Ding Chao, Zhang Yaohong, Kamisaka Taichi, Zhao Qian, Luther Joseph M., Toyoda Taro, Hayase Shuzi, Minemoto Takashi, Yoshino Kenji, Zhang Bing, Dai Songyuan, Jiang Junke, Tao Shuxia, Shen Qing	4. 巻 31
2. 論文標題 Gel2 Additive for High Optoelectronic Quality CsPbI <sub>3</sub> Quantum Dots and Their Application in Photovoltaic Devices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 798 ~ 807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemmater.8b03871	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 Nakazawa Naoki, Zhang Yaohong, Liu Feng, Ding Chao, Hori Kanae, Toyoda Taro, Yao Yingfang, Zhou Yong, Hayase Shuzi, Wang Ruixiang, Zou Zhigang, Shen Qing	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/C8NH00341F	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 Toyoda Taro, Shen Qing, Hironaka Motoki, Kamiyama Keita, Kobayashi Hisayoshi, Hirose Yasushi, Hayase Shuzi	4. 巻 122
2. 論文標題 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> : 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 -

1. 著者名 Wang Ruyi, Li Xiaodong, Wang Lu, Zhao Xirui, Yang Guangcheng, Li Aidong, Wu Congping, Shen Qing, Zhou Yong, Zou Zhigang	4. 巻 10
2. 論文標題 Construction of Al-ZnO/CdS photoanodes modified with distinctive alumina passivation layer for improvement of photoelectrochemical efficiency and stability	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 19621 ~ 19627
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8NR06880A	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 Wang Zhen, Hu Zhaosheng, Kamarudin Muhammad Akmal, Kapil Gaurav, Tripathi Atul, Shen Qing, Yoshino Kenji, Minemoto Takashi, Pandey Sham S., Hayase Shuzi	4. 巻 174
2. 論文標題 Enhancement of charge transport in quantum dots solar cells by N-butylamine-assisted sulfur-crosslinking of PbS quantum dots	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Solar Energy	6. 最初と最後の頁 399 ~ 408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.solener.2018.09.026	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 Ding Chao, Zhang Yaohong, Liu Feng, Kitabatake Yukiko, Hayase Shuzi, Toyoda Taro, Yoshino Kenji, Minemoto Takashi, Katayama Kenji, Shen Qing	4. 巻 53
2. 論文標題 Effect of the conduction band offset on interfacial recombination behavior of the planar perovskite solar cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nano Energy	6. 最初と最後の頁 17 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.08.031	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 Hori Kanae, Zhang Yaohong, Tusamalee Pimsiri, Nakazawa Naoki, Yoshihara Yasuha, Wang Ruixiang, Toyoda Taro, Hayase Shuzi, Shen Qing	4. 巻 8
2. 論文標題 Interface Passivation Effects on the Photovoltaic Performance of Quantum Dot Sensitized Inverse Opal TiO <sub>2</sub> Solar Cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 460 ~ 460
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano8070460	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 Zhang Yaohong, Wu Guohua, Ding Chao, Liu Feng, Yao Yingfang, Zhou Yong, Wu Congping, Nakazawa Naoki, Huang Qingxun, Toyoda Taro, Wang Ruixiang, Hayase Shuzi, Zou Zhigang, Shen Qing	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 Ding Chao, Zhang Yaohong, Liu Feng, Kitabatake Yukiko, Hayase Shuzi, Toyoda Taro, Wang Ruixiang, Yoshino Kenji, Minemoto Takashi, Shen Qing	4. 巻 3
2. 論文標題 Understanding charge transfer and recombination by interface engineering for improving the efficiency of PbS quantum dot solar cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nanoscale Horizons	6. 最初と最後の頁 417 ~ 429
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8NH00030A	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 Toyoda Taro, Shen Qing, Hori Kanae, Nakazawa Naoki, Kamiyama Keita, Hayase Shuzi	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 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 -

1. 著者名 Liu Feng, Zhang Yaohong, Ding Chao, Toyoda Taro, Ogomi Yuhei, Ripolles Teresa S., Hayase Shuzi, Minemoto Takashi, Yoshino Kenji, Dai Songyuan, Shen Qing	4. 巻 9
2. 論文標題 Ultrafast Electron Injection from Photoexcited Perovskite CsPbI <sub>3</sub> QDs into TiO <sub>2</sub> Nanoparticles with Injection Efficiency near 99%	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 294 ~ 297
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.7b03062	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 Shen Qing, Ripolles Teresa S., Even Jacky, Zhang Yaohong, Ding Chao, Liu Feng, Izuishi Takuya, Nakazawa Naoki, Toyoda Taro, Ogomi Yuhei, Hayase Shuzi	4. 巻 27
2. 論文標題 Ultrafast selective extraction of hot holes from cesium lead iodide perovskite films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Energy Chemistry	6. 最初と最後の頁 1170~1174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jechem.2018.01.006	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 Feng Liu, Yaohong Zhang, Chao Ding, Taro Toyoda, Yuhei Ogomi, Teresa S. Ripolles, Shuzi Hayase, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, Songyuan Dai, Qing Shen*.	4. 巻 9
2. 論文標題 Ultrafast electron injection from photoexcited perovskite CsPbI3 QDs into TiO2 nanoparticles with injection efficiency near 99%	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letter	6. 最初と最後の頁 294-297
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.7b03062	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 Feng Liu, Chao Ding, Yaohong Zhang, Teresa S. Ripolles, Taichi Kamisaka, Taro Toyoda, Shuzi Hayase*, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, Songyuan Dai, Masatoshi Yanagida, Hidenori Noguchi, and Qing Shen*	4. 巻 139
2. 論文標題 Colloidal Synthesis of Air-Stable Alloyed CsSn1-xPbxI3 Perovskite Nanocrystals for Use in Solar Cells	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc	6. 最初と最後の頁 16708-16719
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.7b08628	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 Feng Liu, Yaohong Zhang, Chao Ding, Syuusuke Kobayashi, Takuya Izuishi, Naoki Nakazawa, Taro Toyoda, Tsuyoshi Ohta, Shuzi Hayase, Takashi Minemoto, Kenji Yoshino, Songyuan Dai, and Qing Shen*	4. 巻 11
2. 論文標題 Highly Luminescent Phase-Stable CsPbI3 Perovskite Quantum Dots Achieving Near 100% Absolute Photoluminescence Quantum Yield	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 10373-10383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.7b05442	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 Wenran Wang, Guocan Jiang, Juan Yu, Wei Wang, Zhenxiao Pan*, Naoki Nakazawa, Qing Shen*, and Xinhua Zhong	4. 巻 9
2. 論文標題 High Efficiency Quantum Dot Sensitized Solar Cells Based on Direct Adsorption of Quantum Dots on Photoanodes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 22549-22559
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.7b05598	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 Yaohong Zhang, Guohua Wu, Ivan Mora-Sero, Chao Ding, Feng Liu, Qingxun Huang, Yuhei Ogomi, Shuzi Hayase, Taro Toyoda, Ruixiang Wang, Joe Otsuki,* and Qing 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 Letter	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 Wenxiang Peng, Jun Du, Zhenxiao Pan, Naoki Nakazawa, Jiankun Sun, Zhonglin Du, Gencai Shen, Juan Yu, Jin-Song Hu*, Qing Shen*, and Xinhua Zhong*	4. 巻 9
2. 論文標題 Alloying Strategy in CuInGaSe Quantum Dots for High Efficiency Quantum Dot Sensitized Solar Cells	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces,	6. 最初と最後の頁 5328-5336
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.6b14649	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 Zhang Yaohong, Wu Guohua, Ding Chao, Liu Feng, Liu Dong, Masuda Taizo, Yoshino Kenji, Hayase Shuzi, Wang Ruixiang, Shen Qing	4. 巻 12
2. 論文標題 Surface-Modified Graphene Oxide/Lead Sulfide Hybrid Film-Forming Ink for High-Efficiency Bulk Nano-Heterojunction Colloidal Quantum Dot Solar Cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano-Micro Letters	6. 最初と最後の頁 111-1, 111-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1007/s40820-020-00448-8">https://doi.org/10.1007/s40820-020-00448-8</a>	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 Zhang Yaohong, Wu Guohua, Liu Feng, Ding Chao, Zou Zhigang, Shen Qing	4. 巻 49
2. 論文標題 Photoexcited carrier dynamics in colloidal quantum dot solar cells: insights into individual quantum dots, quantum dot solid films and devices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Society Reviews	6. 最初と最後の頁 49 ~ 84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CS00560A	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 Xing Meibo, Zhang Yaohong, Shen Qing, Wang Ruixiang	4. 巻 195
2. 論文標題 Temperature dependent photovoltaic performance of TiO <sub>2</sub> /PbS heterojunction quantum dot solar cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Solar Energy	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.010">https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.010</a>	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 Ding Chao, Liu Feng, Zhang Yaohong, Hirotsugu Daisuke, Rin Xing, Hayase Shuzi, Minemoto Takashi, Masuda Taizo, Wang Ruixiang, Shen Qing	4. 巻 67
2. 論文標題 Photoexcited hot and cold electron and hole dynamics at FAPbI <sub>3</sub> perovskite quantum dots/metal oxide heterojunctions used for stable perovskite quantum dot solar cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Energy	6. 最初と最後の頁 104267 ~ 104267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104267">https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104267</a>	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 Liu Feng, Zhang Yaohong, Ding Chao, Kawabata Kentaro, Yoshihara Yasuha, Toyoda Taro, Hayase Shuzi, Minemoto Takashi, Wang Ruixiang, Shen Qing	4. 巻 32
2. 論文標題 Triethylphosphine Oxide Acts as Alkahest for SnX <sub>2</sub> /PbX <sub>2</sub> : A General Synthetic Route 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/acs.chemmater.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 Liu Feng, Jiang Junke, Zhang Yaohong, Ding Chao, Toyoda Taro, Hayase Shuzi, Wang Ruixiang, Tao Shuxia, Shen Qing	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.201916020	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23件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Qing Shen
2. 発表標題 Phase-Stable and High Optoelectronic Quality All-Inorganic Perovskite Quantum Dots and Their Application in Optoelectronic Devices
3. 学会等名 2019 MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沈青
2. 発表標題 量子ドットの低欠陥化と光励起キャリアダイナミクスおよび光電変換デバイスへの応用
3. 学会等名 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 Qing Shen
2. 発表標題 Colloidal synthesis of phase-stable and less-defect perovskite nanocrystals and application in solar cells
3. 学会等名 International Symposium on Solar Energy Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沈青
2. 発表標題 コロイド量子ドット太陽電池の電荷分離界面の構築と高効率化
3. 学会等名 第3回フロンティア太陽電池セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qing Shen
2. 発表標題 Colloidal Synthesis of Phase-Stable and Defect-Free Perovskite Nanocrystals for Use in Solar Cells
3. 学会等名 the 11th International Summit on Organic and Hybrid Photovoltaics Stability（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qing Shen
2. 発表標題 Phase-Stable and High Optoelectronic Quality All-Inorganic Perovskite Quantum Dots and Their Application in Optoelectronic Devices
3. 学会等名 12 th Aseanian conference on nano-hybrid solar cells（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qing Shen
2. 発表標題 Charge Transfer Dynamics and Photovoltaic Properties of Perovskite Solar Cells: Effects of Interface Engineering on Photoexcited Carrier Dynamics and Photovoltaic Performance of Perovskite Solar Cells
3. 学会等名 The International Conference on Perovskite Thin Film Photovoltaics Perovskite Photonics and Optoelectronics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qing Shen
2. 発表標題 Charge Transfer Dynamics and Photovoltaic Properties of Perovskite Solar Cells: Effects of the Energy Level Alignment of Zn1-xMgxO Electron Selective Layer,
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qing Shen
2. 発表標題 Interface Engineering, Photoexcited Carrier Dynamics and Mechanism for Improving Photovoltaic Performance of Perovskite Solar Cells
3. 学会等名 The 5th Conference on New Generation Solar Cells (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 沈 青
2. 発表標題 量子ドット太陽電池の電荷分離界面の構築と高効率化への道筋
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 沈 青
2. 発表標題 量子ドット太陽電池の電荷分離界面の構築と高効率化への道筋
3. 学会等名 第14回「次世代の太陽光発電システム」 - 未来に向けた太陽光発電の新たな価値創出へー (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中澤 直樹, Yaohong Zhang, 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-量子ドット間距離依存性-
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 吉田康二, 丁超, 大図 修平, 北畠 有紀子, 張 耀紅, 中澤直樹, 豊田太郎, 早瀬修二, 沈青
2. 発表標題 異なるヨウ化物塩からの無機リガンドの表面修飾による量子ドット 太陽電池の光電変換特性の変化とそのメカニズム
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 大図 修平, 北畠 有紀子, 吉田 康二, 豊田 太郎, 尾込 裕平, 早瀬 修二, 沈 青
2. 発表標題 SnO <sub>2</sub> 界面パッシベーション による PbS量子ドット太陽電池の光電変換特性の向上
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 北畠有紀子, 中澤直樹, 大図修平, 豊田太郎, 早瀬修二, 片山健二, 沈青
2. 発表標題 PbS量子ドット太陽電池における開放電圧と 光吸収層のアーバックエネルギーの粒径依存性
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 堀 奏江, 藤野 秀一朗, 豊田 太郎, 早瀬 修二, 沈 青
2. 発表標題 量子ドット増感太陽電池の界面パッシベーション効果
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 藤野 秀一朗, 中澤 直樹, 堀 奏江, 上坂 太一, 大岡 修平, 豊田 太郎, 早瀬 修二, 沈 青
2. 発表標題 Sb2S3固体型増感太陽電池の界面パッシベーションによる光電変換特性の向上
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 吉原 泰葉, 堀 奏江, 藤野 秀一朗, 豊田 太郎, 早瀬修二, 沈 青
2. 発表標題 逆オパールノ構造TiO2を用いた固体型Sb2S3増感太陽電池に関する研究
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 Qing SHEN, Feng LIU, Yaohong ZHANG, Chao DING, Taro TOYODA, Shuzi HAYASE
2. 発表標題 Less-Defect Perovskite Quantum Dots: Synthesis, Optical Properties and Application to Optoelectronic Devices
3. 学会等名 Materials research meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Qing Shen , Feng Liu , Chao Ding , Yaohong Zhang , Taro Toyoda, Shuzi Hayase
2. 発表標題 Phase Stable and Less-Defect Perovskite Quantum Dots: Optical Property, Photoexcited Hot Carrier Dynamics, Charge Transfer
3. 学会等名 nanoGe Fall Meeting19 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Qing Shen, Chao Ding, Yaohong Zhang, Feng Liu, Taro Toyoda, Kenji Yoshino, Takashi Minemoto, Shuzi Hayase
2. 発表標題 Surface Coatings for Improving Solar Cell Efficiencies
3. 学会等名 14th Topical Meeting on Optical Interference Coatings (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Liu, Y. Zhang, C. Ding, T. Toyoda, S. Hayase, and Q. Shen
2. 発表標題 Less-Defect Perovskite Nanocrystals: Optical Properties and Application to Solar Cells
3. 学会等名 the 6th Conference on Science and Technology of Emerging Solar Energy Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Liu, Y. Zhang, C. Ding, T. Toyoda, S. Hayase, and Q. Shen
2. 発表標題 Phase-stable and high optoelectronic quality all-inorganic perovskite quantum dots and their application in optoelectronic
3. 学会等名 2019 MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 Preparation method of formamidinium lead halide perovskite quantum dots	発明者 T. Masuda, Q. Shen et al.	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、16420351	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 ホルムアミジニウムハロゲン化鉛ペロブスカイト量子ドットの調製方法	発明者 増田泰造、佐々木清 人、沈青、劉鋒、張 耀紅、丁超	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、201910427519.0	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 メチルアンモニウムハロゲン化鉛ペロブスカイト量子ドットの製造法	発明者 増田泰造、沈青、丁 超、張耀紅、劉鋒	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2020-069816	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	豊田 太郎  (Toyoda Taro)  (40217576)	電気通信大学・その他部局等・名誉教授   (12612)	
連 携 研 究 者	早瀬 修二  (Hayase Shuzi)  (80336099)	電気通信大学・i-パワードエネルギー・システム研究セン ター・特任教授   (12612)	