

平成 24 年 5 月 28 日現在

機関番号：12612
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21310073
 研究課題名（和文） 光電極に吸着した半導体量子ドットにおける多重励起子生成と緩和のダイナミクス
 研究課題名（英文） Generation and Relaxation Dynamics of Multiple Excitons in Semiconductor Quantum Dots Adsorbed on Electrodes
 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・助教
 研究者番号：50282926

研究成果の概要（和文）：安価かつ高効率な次世代太陽電池の候補の一つとして期待されている半導体量子ドット増感太陽電池のエネルギー変換効率向上の指針を与えることに目指して、①半導体量子ドット増感ナノ構造光電極の作製と各種特性の評価を行い、②①の系に対して、光励起キャリアダイナミクスの評価を行った。表面修飾と規則性よいナノ構造光電極および複合化量子ドットの適用により光電変換機能を向上させることができた。また、PbS 量子ドットの多重励起子生成と緩和ダイナミクスの測定に成功し、興味深い結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：In this study, semiconductor QDs were used as light harvesters in sensitized nanocrystalline TiO₂ solar cells. The energy conversion efficiency is expected to be improved by (1) modifying and controlling the nano-interfaces in the semiconductor QDs sensitized solar cells and (2) finding the optimized experimental conditions for high efficient MEG in semiconductor QDs. We have found that photovoltaic performances can be improved greatly by applying surface modification, ordered nanostructured TiO₂ electrodes, and co-sensitization of QDs. We have succeeded in measuring the multiple exciton generation (MEG) and relaxation dynamics in PbS QDs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	11,100,000	3,330,000	14,200,000
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ材料・ナノバイオサイエンス

キーワード：ナノ機能材料、量子ドット、多重励起子生成、太陽電池

1. 研究開始当初の背景

現在エネルギーと環境問題はますます深刻になってきたため、無尽蔵で安全なエネルギー源である太陽光の活用が強く望まれて

いる。しかし、太陽エネルギーは大きな可能性があるにも関わらず、現在ごくわずかしが利用されていない。その原因は、太陽電池の作製コストが高く、かつ変換効率が十分には高くないことにある。近年、ナノ材料やナノ

テクノロジーの発展と共に、安価・簡便で作製可能かつ高効率な次世代太陽電池の実現の可能性が期待できるようになった。

数ナノメートル程度に微粒子化した半導体（半導体ナノ粒子あるいは半導体量子ドットと呼ばれる）では、量子閉じ込め効果が発現し、サイズに依存した物性変化が光学的特性に顕著に現れ、応用的観点からもバルク系に比べて著しい機能性向上が見られる。特に、半導体量子ドットを太陽電池へ利用する際に以下のような特徴が有利である。①**量子サイズ効果**：そのサイズをコントロールすることにより、太陽光スペクトルにマッチした光吸収スペクトルが得られる。②**多重励起子生成効率向上**：半導体量子ドットのエネルギーギャップの2倍以上エネルギーを持つ光子を吸収した場合、**1個の光子で複数励起子(電子-正孔対)が生成できる**多重励起子生成(MEG: Multiple Exciton Generation)が発現する。これが数年前に理論的に予言され、最近単独のコロイド(PbS, PbSe など)に対して過渡吸収法により実験的にも確認された。半導体量子ドットのMEG効果を太陽電池へ応用できれば、従来熱として無駄となった太陽光の入射エネルギーをさらに電力へ変換するため、太陽電池のエネルギー変換効率の著しい向上(理論限界は44%)が期待される。そのために、半導体量子ドットの利用が太陽エネルギーの有効な活用に向けて重要であることが認識され、近年世界中で大きな関心が示されている。それらの中で、安価かつ簡便に作製できる半導体量子ドット増感ナノ構造 TiO₂ 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現在3%以下である。最も大きな要因は、①半導体量子ドットとそれを取り巻く周囲媒体との相互作用や、光機能性に関与するナノ接合光機能界面の状態に関する基礎的理解が不足していること、②半導体量子ドットを吸着した光電極系においてMEG効果の発現がまだ達成されていないこと、などが挙げられる。

2. 研究の目的

(1) 表面形態の異なったナノ構造 TiO₂ 光電極に溶液成長法で半導体量子ドット(CdS, CdSe, PbSe, PbS) を作製し各種特性の評価を行う。

(2) (1) の系に対して、高速光熱変換法の一つである簡易型過渡回折格子法を用いて光励起キャリア緩和ダイナミクスならびにMEG出現のダイナミクスの評価を行う。

(3) (1) と (2) に基づいて、量子ドット増感太陽電池の光電変換効率向上の指針を与える。

3. 研究の方法

(1) 表面形態の異なった TiO₂ 光電極の形成

① TiO₂ ナノ粒子光電極

数 nm から数 10 nm の TiO₂ ナノ粒子と、増粘剤であるポリエチレングリコール (PEG) および分散剤であるアセチルアセトン純水に加えて攪拌することによって、TiO₂ のペーストを調整する。そのペーストを導電性ガラス FTO 基板上に塗布し、熱処理を行うと多孔質のナノ構造 TiO₂ 薄膜を作製する。

② TiO₂ ナノチューブ光電極

金属 Ti を電解質溶液(フッ酸系、フッ化カリウム系、フッ化アンモニウム系)中で陽極化成し成長させる手法を適用する。形成された TiO₂ ナノチューブ光電極では、CdSe などの半導体量子ドットは規則性よく TiO₂ ナノチューブ表面に吸着できると予想できる。さらに、従来の TiO₂ ナノ粒子で形成された光電極と比較して、電気伝導性と光化学電流の向上が期待できる。TiO₂ ナノチューブ光電極の Morphology や特性と、作製条件との相関性について詳細な検討を行う。

③ 逆オパール TiO₂ 光電極

自己組織化法により、透明導電性ガラス上に、面心立方構造の鋳型を形成したテンプレートを用意し、これにメタノールを溶媒とする TiCl₄ 溶液を滴下、加水分解を数回繰り返す、その後 450°C で熱処理を行うことで逆オパール構造の TiO₂ 基板の作製を行った。

(2) TiO₂ 電極への半導体量子ドットの吸着とその各種特性の評価

以上で作製した各種 TiO₂ 電極に、II-VI 族化合物半導体の CdSe と CdS 量子ドットと IV-VI 族 PbS 量子ドットを吸着する。吸着手法としては、反応溶液内で化学吸着する自己組織化法である溶液成長法を適用する [2, 5]。作製検討パラメータとして吸着温度と時間、反応溶液の混率と濃度が重要であり、これらの制御により粒径分布と面内分布の均一性向上を図る。以上で作製した試料に対して、構造評価、光物性評価、光化学電流特性評価、エネルギー変換効率評価と、各ナノ接合光機能界面における抵抗の評価を行い、半導体量子ドットの吸着条件とこれらの特性との相関性について詳細な検討を行う。

(3) 半導体量子ドットにおける光励起キャリア緩和ダイナミクスの評価

フェムト秒過渡回折格子法を用いて、単独と電極に吸着した各種半導体量子ドットの光励起キャリアのダイナミクスを評価する。励起光の波長や強度の依存性を測定し、光励起キャリアの注入や表面・界面準位によるトラップおよび電子-正孔の再結合などの緩和プロセスを評価する。さらに、多重励起子

の生成と緩和ダイナミクスおよび多重起
子生成条件を評価する。

4. 研究成果

(1) 半導体量子ドット吸着した TiO₂ 電極の光電変換機能を向上させる各種パラメータについての検討

① ZnS 表面修飾効果

ZnS 表面修飾を各種量子ドット吸着した TiO₂ 電極に適用し、各種特性（光吸収特性、IPCE、光電変換特性、電極-電解液界面抵抗と安定性）にどのような影響を与えるかについて検討した。その結果、ZnS 表面修飾により、IPCE と光電変換特性は ZnS の吸着回数の増加と共に向上し、ある最適な吸着回数を超えると再び低下したことが分かった。また、ZnS 吸着により、量子ドット増感太陽電池の安定性が著しく向上した。インピーダンス測定の結果から、ZnS の表面修飾により量子ドット吸着した TiO₂ 電極と電解液界面における再結合抵抗が著しく減少したことが分かった。これらの結果より、ZnS の表面吸着層の形成を通して、量子ドットと TiO₂ 電極から電解液への逆電子移動が防止されたことが分かった。

また、ZnS の表面吸着による量子ドット表面準位の減少に伴う光励起キャリアダイナミクスの変化について検討した。時間分解レーザー分光測定により、光励起キャリアのダイナミクスが三つの緩和成分（時定数がそれぞれ数 ps (A)、数 10 ps (B)、数 100 ps から数 ns (C)）が見られた。A, B, C の三つの緩和成分がそれぞれ電子注入、表面トラップと再結合のプロセスに対応すると考えられる。ZnS 表面修飾による電子注入速度定数と注入率の変化がほとんど見られなかった。一方、表面トラップ成分 B においては、ZnS 表面修飾回数の増加と共に、緩和時定数がほとんど変化しなかったが、トラップされた電子の割合が顕著に減少したことが分かった。また、再結合緩和成分 C においては、ZnS 表面修飾回数の増加と共に、緩和時定数と割合両方が増加したことが分かった。これらの結果から、ZnS 表面修飾により、電子注入がほとんど変化しないことに対して、表面トラップ準位が減少し、直接再結合が増加したことが分かった。これらの結果は、ZnS 表面修飾による量子ドット増感太陽電池の光電変換特性の向上と電極/電解液界面における再結合抵抗の減少など結果によく対応すると考えられる。

② 光電極のナノ構造依存性

規則性よくない TiO₂ ナノ粒子電極と 3 次元的に規則性よい逆オパール電極を用いた

CdSe 量子ドット増感太陽電池を作製し、各種特性（光吸収、IPCE、光電変換特性）評価を行い、TiO₂ 光電極のナノ構造は量子ドット増感太陽電池の光電変換特性への影響について検討した。2 種類の TiO₂ 電極の厚さが同じで、また同じサイズの CdSe 量子ドットを吸着した。光吸収スペクトルはほぼ同じであったが、TiO₂ ナノ粒子電極を用いた量子ドット増感太陽電池の IPCE ピーク値 (60%) が逆オパール電極を用いたものの IPCE ピーク値 (45%) より大きいことが観察された。これは、逆オパール電極の比表面積がナノ粒子電極の比表面積の約 3 分の 1 であり、吸着した CdSe 量子ドットの量が少ないためであると考えられる。また、逆オパール電極を用いた場合の短絡電流 (7.7 mA/cm²) がナノ粒子電極を用いた場合の短絡電流 (8.6 mA/cm²) より小さいことが分かった。この結果は IPCE の結果とよく一致する。一方、逆オパール電極を用いた場合の開放電圧 (0.7 V) がナノ粒子電極を用いた場合での開放電圧 (0.5 V) より 0.2 V 大きいことが見られた。開放電圧は TiO₂ 電極の準フェルミ準位と電解液の酸化還元電位の差である。すべての場合では、同じ polysulfide 電解液を用いたため、逆オパール電極の適用による開放電圧の向上の原因としては、①量子ドットから TiO₂ 電極への電子注入数の増加；②表面、界面欠陥を介した再結合や逆電子移動の減少であると考えられる。しかし、逆オパール電極を用いた場合の短絡電流が低いことから、①の原因ではないことが分かった。逆オパール TiO₂ の骨格に沿って規則よい量子ドットの吸着により、①TiO₂ 電極のトラップサイトの減少、②TiO₂ 電極と電解液の接触界面の減少であることが示唆される。以上のように、逆オパール電極の適用による開放電圧 (0.2 V) と変換効率の向上 (増加率：35%) に成功した。

③ 量子ドット複合化の効果

次に、増感材である半導体量子ドットの複合化による光電変換機能の向上について検討した。私たちのグループを含め、いくつかの研究グループより、CdS/CdSe 複合化量子ドットの適用により、単独の量子ドットの使用と比べ、光電変換特性が向上したことを見出したが、そのメカニズムはまだ解明されていない。そこで、量子ドット複合化による光励起キャリアダイナミクスの変化の観点から検討し、そのメカニズムの解明を行った。CdS を先に 30 分間で吸着した後 CdSe を 6 時間の吸着を行った。また、比較のために、CdSe のみ 6 時間吸着した試料も作製した。CdS のみ吸着したものと CdSe のみ吸着したものの光吸収スペクトルより、CdS と CdSe のサイズはそれぞれ約 4 nm と 6.6 nm であることを推定した。また、CdS/CdSe 複合した電極と CdSe

のみ吸着した電極の光吸収スペクトルがほぼ同じである。しかし、CdS/CdSe 複合化した電極の場合では IPCE 値(70%)が CdSe のみ吸着した電極の IPCE 値(55%)より大きいことが確認された。CdS 吸収がない波長領域(400 nm - 650nm)において IPCE 値が大きいことから、CdS の光吸収による IPCE 値の向上ではないことが考察できる。また、光電変換特性の評価結果より、CdS/CdSe 複合化による短絡電流の向上が見られた。これは IPCE の結果と一致する。時間分解レーザー分光法により、2種類の試料において、CdSe 量子ドットにおける光励起電子ダイナミクスを測定したところ、CdS/CdSe 複合化した試料における電子移動速度定数が CdSe のみ吸着したものの電子移動速度定数より大きくなったことが判明した。この結果から、量子ドットの複合化により CdSe 量子ドット中の光励起電子と正孔の電荷分離が促進されたため、IPCE と短絡電流そして変換効率の向上が実現されたと考えられる。

(2) PbS 半導体量子ドットにおける多重励起子生成 (MEG) 評価

半導体量子ドットの多重励起子生成 (MEG) の新しい評価法として改良型 TG 法を開発し、異なるサイズの PbS 量子ドットにおける光励起キャリア緩和過程の評価に適用した。開発した手法により、PbS 量子ドットにおける MEG の発現を確認でき、単独半導体量子ドットにおける MEG 発現条件 (励起光エネルギーは PbS 量子ドットの LUMO と HOMO 間のエネルギー差 E_g の 2.7 倍以上であること) と発現時間(光励起後約 2-3 ps)を見出した。また、MEG 生成の量子収率 (QY) の見積る方法を提案し、MEG 生成の QY の量子ドットサイズ依存性と励起光波長依存性を検討した。その結果、励起光のフォトンエネルギーが PbS 量子ドットの E_g の 3.5 倍の時に、QY は 150% であり、励起光のフォトンエネルギーの増加と共に QY も増加することが分かった。また、測定した MEG の実験結果は Photocharging による偽現象ではないことを確認するために、PbS 量子ドットコロイド溶液を攪拌しながら、実験を行った。その結果は、今まで攪拌なしで得られた実験結果とよく一致した。これらの結果より、これまでに得られた MEG の実験結果は Photocharging による偽現象ではないことを確認できた。さらに、ホットキャリアの緩和と MEG の発現ダイナミクスの解析および MEG のメカニズムの解明について検討した。TG 応答より、ホットキャリアが 1 ps 以内に緩和していくと共に、MEG は 200 fs 以内に始まり、同時に LUMO でのキャリア密度が増加し 2 ps 程度で飽和する現象を見つけた。

また、ZrO₂ 薄膜に吸着した PbS 量子ドットの MEG 生成について、初めて TG 法により評

価を行った。ZrO₂ 薄膜に吸着した PbS 量子ドットでも、コロイド溶液中に分散した単独の PbS 量子ドットと同じような条件で MEG が発現することを初めて確認できた。さらに、ZrO₂ と TiO₂ 基板上に吸着した PbS 量子ドットの MEG に関する実験を進めている。TiO₂ 基板上に吸着した PbS 量子ドットから TiO₂ 電極へのホット電子の注入の可能性が見られて、MEG 発現との相関について詳しく検討していく予定である。

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 21 件)

- (1) S. Hachiya, Q. Shen and T. Toyoda: Effect of ZnS Coatings on Enhance the Photovoltaic Properties of PbS Quantum Dot-sensitized Solar Cells, *J. Appl. Phys.*, 2012, in press, DOI: 10.1063/1.4720468.
- (2) S. Hachiya, Y. Onishi, Q. Shen and T. Toyoda: Dependences of the optical absorption and photovoltaic properties of CdS quantum dot-sensitized solar cells on the CdS quantum dot adsorption time, *J. Appl. Phys.*, **Vol. 110**, pp. 054319-1~5, 2011. DOI: 10.1063/1.3630114
- (3) N. Guijarro, J. M. Campin, Q. Shen, T. Toyoda, T. Lana-Villarreal, R. Gómez: Uncovering the role of the ZnS treatment in the performance of quantum dot sensitized solar cells, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **Vol. 13**, pp. 12024-12032, 2011. DOI:10.1039/C1CP20290A
- (4) Q. X. Zhang, X. Z. Guo, X. M. Huang, S. Q. Huang, D. M. Li, Y. Hong Luo, Q. Shen, T. Toyoda and Q.B. Meng: Highly Efficient CdS/CdSe-Sensitized Solar Cells Controlled by the Structural Properties of Mesoporous TiO₂ Photoelectrodes, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **Vol. 13**, pp. 4649-4667, 2011. DOI: 10.1039/c0cp02099k
- (5) Q. Shen, Y. Ayuzawa, K. katayama, T. Sawada, and T. Toyoda: Separation of Ultrafast Photoexcited Electron and Hole Dynamics in CdSe Quantum Dots Adsorbed onto Nanostructured TiO₂ Films, *Appl. Phys. Lett.*, **Vol. 97**, pp. 263113-1~3, 2010. DOI:10.1063/1.3533374
- (6) Q. Shen, A. Yamada, S. Tamura, and T. Toyoda: CdSe Quantum Dot-Sensitized Solar Cell Employing TiO₂ Nanotube Working-Electrode and Cu₂S Counter-Electrode, *Appl. Phys. Lett.*, **Vol. 97**, pp.123107-1~3, 2010.

- DOI:10.1063/1.3491245
- (7) T. Toyoda, K. Oshikane, D. M. Li, Y. H. Luo, Q. B. Meng, and Q. Shen: Photoacoustic and Photoelectrochemical Current Spectra of Combined CdS/CdSe Quantum Dots Adsorbed on Nanostructured TiO₂ Electrodes, together with Photovoltaic Characteristics, *J. Appl. Phys.*, **Vol. 108**, pp. 114304-1~7, 2010.
DOI:10.1063/1.3517066
- (8) N. Guijarro, Q. Shen, S. Giménez, I. Mora-Seró, J. Bisquert, T. Lana-Villarreal, T. Toyoda, R. Gómez: Direct Correlation between Ultrafast Injection and Photoanode Performance in Quantum-Dot Sensitized Solar Cells, *J. Phys. Chem. C*, **Vol. 114**, pp. 22352-22360, 2010.
DOI:10.1021/jp108499h
- (9) N. Guijarro, T. Lana-Villarreal, Q. Shen, T. Toyoda, and R. Gómez: Sensitization of Titanium Dioxide Photoanodes with Cadmium Selenide Quantum Dots Prepared by SILAR: Photoelectrochemical and Carrier Dynamics Studies, *J. Phys. Chem. C*, **Vol. 114**, pp. 21928- 21937, 2010.
DOI:10.1021/jp105890x
- (10) M. Deng, Q. Zhang, S. Huang, D. Li, Y. Luo, Q. Shen, T. Toyoda, and Q. Meng: Low-Cost Flexible Nano-Sulfide/Carbon Composite Counter Electrode for Quantum-Dot-Sensitized Solar Cell, *Nanoscale Res. Lett.*, **Vol. 5**, pp. 986-990, 2010.
DOI: 10.1007/s11671-010-9592-3
- (11) I. Mora-Sero, S. Gimenez, F. Fabregat-Santiago, R. Gomez, Q. Shen, T. Toyoda and J. Bisquert: Recombination in Quantum Dot Sensitized Solar Cells, *Acc. Chem. Res.*, **Vol. 42**, pp. 1848-1857, 2009.
DOI: 10.1021/ar900134d
- [学会発表] (計 60 件)
- (1) 沈 青 : Dynamics of Multiple Exciton Generation in PbS Quantum Dots, 日本化学会第 9 2 春季年会 (2012 年 3 月 27 日、東京)。
- (2) 沈 青、 鮎沢康正、 豊田太郎 : 逆オパール構造 TiO₂ 電極に吸着した CdSe 量子ドットの 光吸収と光電変換特性、第 32 回日本熱物性シンポジウム (2011 年 11 月 23 日、東京)。
- (3) Q. Shen, S. Hachiya (電通大), K. Katayama (中央大), T. Sawada (J S T), and T. Toyoda (電通大) : Photovoltaic Property and Ultrafast Carrier Dynamics in Quantum Dot Sensitized Solar Cells, Low Carbon Earth Summit (2011/10/21, Dalian, China).
- (4) Q. Shen, S. Hachiya, K. Katayama, T. Sawada, and T. Toyoda: Hot Carrier Dynamics and Multiple Exciton Generation in PbS Quantum Dots, The 6th Aseanian Conference on Dye-sensitized and Organic Solar Cells (2011/10/18, Beppu, Japan).
- (5) Q. Shen, K. Katayama, T. Sawada, S. Hachiya, and T. Toyoda: Observation of Multiple Exciton Generation in PbS Colloidal Quantum Dots Using An Improved Transient Grating Technique, The 2nd Semiconductor Sensitized Solar Cells Conference (2011/9/19, Mallorca, Spain).
- (6) Q. Shen, K. Katayama, S. Hachiya, T. Sawada, and T. Toyoda: Characterization of Multiple Exciton Generation in PbS Quantum Dots Characterized with an Improved Transient Grating Technique, The 9th International Meeting of Pacific Rim Ceramic Societies (PacRim9) (2011/7/11, Australia).
- (7) Q. Shen, K. Katayama, S. Hachiya, T. Sawada, and T. Toyoda: Hot Carrier and Multiple Exciton Generation in PbS Colloidal Quantum Dots Characterized with An Improved Transient Grating Technique, 2011 MRS Spring Meeting Symposia (2011/4/16, San Francisco, U.S.A).
- (8) 沈 青: P b S 量子ドットの多重励起子生成の評価、日本化学会第 9 1 春季年会 (2011 年 3 月 28 日、東京)。
- (9) 豊田太郎、大西陽平、沈 青、押鐘敬太、鮎沢康正: CdS 量子ドットを吸着した逆オパール構造 TiO₂ 電極の光吸収と光電変換特性、第 7 1 回応用物理学会学術講演会 (2010)
- (10) 山田修三、細野英司、周豪慎、沈 青、豊田太郎 : 多孔質 ZnO 薄膜の光音響スペクトルと光電変換特性、第 7 1 回応用物理学会学術講演会 (2010 年 9 月 17 日、長崎)。
- (11) 豊田太郎、鮎沢康正、沈 青、片山健二 : CdSe 量子ドットの表面修飾による光励起キャリアダイナミクスの変化、第 7 1 回応用物理学会学術講演会 (2010 年 9 月 15 日、長崎)。
- (12) Q. Shen, Y. Ayuzawa, K. Katayama, T. Sawada and T. Toyoda: Ultrafast Photoexcited Electron and Hole Dynamics in CdSe Quantum Dots Adsorbed onto Nanostructured TiO₂ Films, 5th Aseanian Conference on Dye-sensitized and Organic Solar Cells (HuangShan, China, August 2010).
- (13) T. Toyoda, Q. Shen and Y. Ayuzawa: Semiconductor Quantum Dot-Sensitized Solar Cells and Photoexcited Carrier Dynamics, 18th International Conference on Photochemical Conversion and Storage of

- Solar Energy (Korea, July 2010).
- (14) Q. Shen, Y. Ayuzawa, K. Katayama, T. Sawada and T. Toyoda: Photovoltaic Properties and Ultrafast Carrier Dynamics of CdSe QD Sensitized Solar Cells, Renewable Energy 2010 (Yokohama, June 2010).
- (15) 沈 青、豊田太郎: 半導体量子ドットの応答特性と分光増感特性、第 2 回環境・生体の関わる物理・化学の研究会 (2010 年 6 月 6 日、沖縄) (招待講演)。
- (16) Q. Shen, Y. Ayuzawa, K. Katayama, T. Sawada, and T. Toyoda : Effects of surface modification on the photovoltaic properties and the ultrafast carrier dynamics for CdSe QD sensitized solar cells, International Workshop on Semiconductor Sensitized Solar Cells (2010/2/9, Jerusalem, Israel).
- (17) Q. Shen, K. Katayama, T. Sawada, and T. Toyoda: Effects of the surrounding media on the photoexcited electron and phonon dynamics of Au nanoparticles characterized using transient grating technique, 2009 MRS Fall Meeting Symposia (2009/12/2, Boston, U.S.A).
- (18) Q. Shen, K. Katayama, T. Sawada, and T. Toyoda: Characterization of electron and hole dynamics in CdSe quantum dots adsorbed onto nanostructured TiO₂ electrodes using near-field, 2009 MRS Fall Meeting Symposia (2009/12/2, Boston, U.S.A).
- (19) Q. Shen, K. Katayama, T. Sawada, and T. Toyoda: Photoexcited carrier dynamics of ZnO nanostructured films characterized using transient grating technique, 2009 MRS Fall Meeting Symposia (2009/12/2, Boston, U.S.A).

[図書] (計 4 件)

- (1) Q. Shen and T. Toyoda, "Semiconductor Quantum Dot-Sensitized Solar Cells Employing TiO₂ Nanostructured Photoanodes with Different Morphologies", *Quantum Dot Devices*, Chapter 13, Wang, Zhiming M. (Ed.), (Springer, 2012), ISBN 978-1-4614-3569-3.
- (2) Q. Shen and T. Toyoda, "Ultrafast Electron and Hole Dynamics in CdSe Quantum Dot Sensitized Solar Cells", *Solar Cells - New Aspects and Solutions*, Chapters 13, Leonid A. Kosyachenko (Ed.), (InTech, 2011), ISBN 978-953-307-761-1.
- (3) T. Toyoda and Q. Shen, "Optical Absorption and Photocurrent Spectra of CdSe Quantum Dots Adsorbed on Nanocrystalline TiO₂ Electrode Together with Photovoltaic

- Properties", *Solar Cells - New Aspects and Solutions*, Chapters 22, Leonid A. Kosyachenko (Ed.), (InTech, 2011), ISBN 978-953-307-761-1.
- (4) Q. Shen and T. Toyoda, "Semiconductor quantum dot-sensitized solar cells: effects of surface modification and photoanode morphology on photovoltaic properties", *Trends and Topics in Sensitized and Organic Solar Cells*, Miyasaka T. (Ed.), (CMC, 2012), in press.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://kjk.office.uec.ac.jp/Profiles/0001/0000468/profile.html>

6. 研究組織

(1) 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・助教

研究者番号 : 50282926

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし