

研究報告書

「半導体量子ドットの多重励起子生成と太陽電池への応用」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成21年10月～平成25年3月

研究者: 沈 青

1. 研究のねらい

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る。太陽エネルギー電力源として太陽電池があるが、問題点として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。一方、半導体量子ドットを利用した太陽電池(量子ドット太陽電池)は、現在まだ基礎研究段階であるが、集光時の理論効率は60%以上ともいわれる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強みは、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、図1に示すような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。半導体量子ドットにおけるMEGを効率的に生成出来ることが10年前に理論的に予測され、近年実験的にも確認された[1,2]。MEGを太陽電池に応用するために、MEGのメカニズム、半導体量子ドットにおけるホットキャリアの緩和機構、多重励起子生成と緩和ダイナミクスの解明が重要であるが、まだ十分に理解されていない。一方、MEGを利用できる太陽電池のデバイス構造の一つとして、安価に作製できる量子ドット増感太陽電池が提案されている[2]。しかし、この系のエネルギー変換効率は現在5%以下である。その主な原因としては、各ナノ機能界面(量子ドット/TiO₂ ナノ電極、量子ドット/電解液界面など)に関する理解と制御がまだ十分ではないことにある。

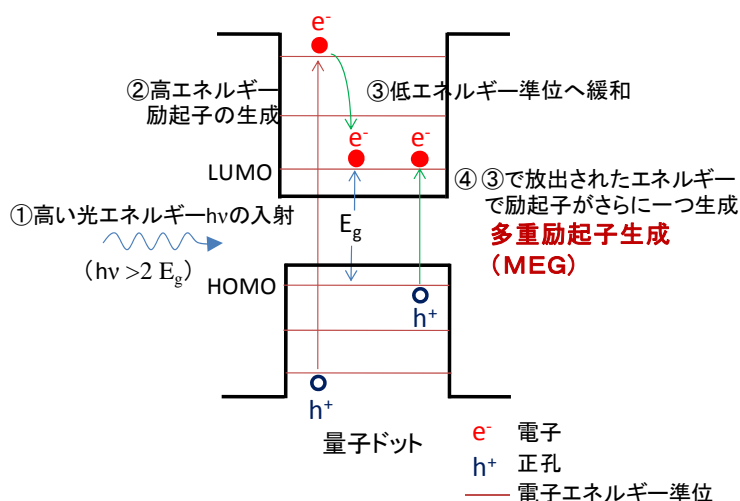


図1 量子ドットにおける多重励起子生成(MEG)の模式図

本研究では、MEGの有効利用とナノ構造光電極に対する半導体量子ドットの増感機能の向上のための指針を与えることを目的として、(1)ナノ構造光電極に吸着した半導体量子ドットの作製と評価、(2)(1)の系に対して、高速レーザー分光法の一つである改良型過渡回折格子(TG)法[3,4]を用いて光励起キャリア・光エネルギーの緩和機構の解明を行い、①MEG発現に関わるキャリア生成・緩和ダイナミクスの解明、②各ナノ接合光機能界面の評価と制御に還元し、安価・高効率な半導体量子ドット増感太陽電池の創成を図る。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、以下の4テーマで研究を進めてきた。

研究テーマA 「半導体量子ドットを吸着したTiO₂光電極系の作製と評価」

研究テーマB 「ナノ接合機能界面改質」

研究テーマC 「半導体量子ドットにおける光励起キャリア緩和過程の評価と多重励起子生成(MEG)メカニズムの解明」

研究テーマD 「半導体量子ドット増感TiO₂太陽電池の作製と評価」

以下はこの4テーマで得られた主な研究成果の概要である。

- (a) 半導体量子ドット(QD)を吸着した電極系の化学的な作製法(4種類)の確立と各ナノ接合機能界面の制御を実現できた。具体的に、①量子ドット吸着の方法・条件と複合化の効果、②吸着電極の表面形態(ナノ粒子、ナノチューブ、規則的な逆オパール)の依存性、③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と光電変換特性の変化およびそのメカニズムなどについて検討を行った。これらの結果により、量子ドット吸着電極の光電変換機能の各種パラメータ(J_{sc} , V_{oc} , FF, と効率)の向上に関わる因子を解明した。
- (b) PbSの量子ドットをモデル材料として適用し、半導体量子ドットの多重励起子生成(MEG)過程と緩和過程の解明に成功した。具体的に、①MEGの新しい評価手法の開発、②MEGの発現(200 fs)から収束(3 ps)、消滅(数10 ps)するまでのプロセスをとらえることに、世界で初めての成功、③MEGの発現条件(光エネルギーが量子ドットのバンドギャップ E_g の2.7倍以上)の同定などが挙げられる。これらの成果により、MEG型量子ドット太陽電池デバイス設計の指針となる基礎データの取得に成功した。

(2) 詳細

(a) 量子ドット増感 TiO₂ 電極の光電変換機能の向上に関わる因子の解明[5,6]

① 量子ドットの表面修飾効果

半導体量子ドット(CdSe, PbS, CdS)の表面に適切な ZnS 表面修飾により、光電流変換量子効率(IPCE)、短絡電流、開放電圧、変換効率および安定性の著しい向上が実現できた。そのメカニズムを解明するために、①交流インピーダンス測定による TiO₂/量子ドット光電極と電解液界面での再結合抵抗の評価;②過渡電圧法による TiO₂ 電極に注入された電子の寿命の評価;③レーザー分光法による量子ドットの光励起キャリアダイナミクス(電荷分離、トラップと再結合)の評価等を行った。これらの実験結果により、適切な ZnS 表面修飾による TiO₂ から電解液への逆電子移動反応の減少や量子ドットの表面・界面準位の減少と共に TiO₂ への電子注入効率の向上により、各種光電変換特性が向上できたことを判明した。

② TiO₂ 光電極のナノ構造依存性

規則性が良くない TiO₂ ナノ粒子電極と 3 次元的に規則性が良好な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 光電極のナノ構造が量子ドット増感太陽電池の光電変換特性に及ぼす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 電極の準フェルミー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。②の原因を確認するために、交流インピーダンス法を用いて電極と電解質界面における電子移動反応抵抗 R_{ct} を測定した。その結果、逆オパール電極を用いた場合の R_{ct} はナノ粒子電極の場合の R_{ct} より 1 桁以上大きくなったことが分かった。この結果は、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。

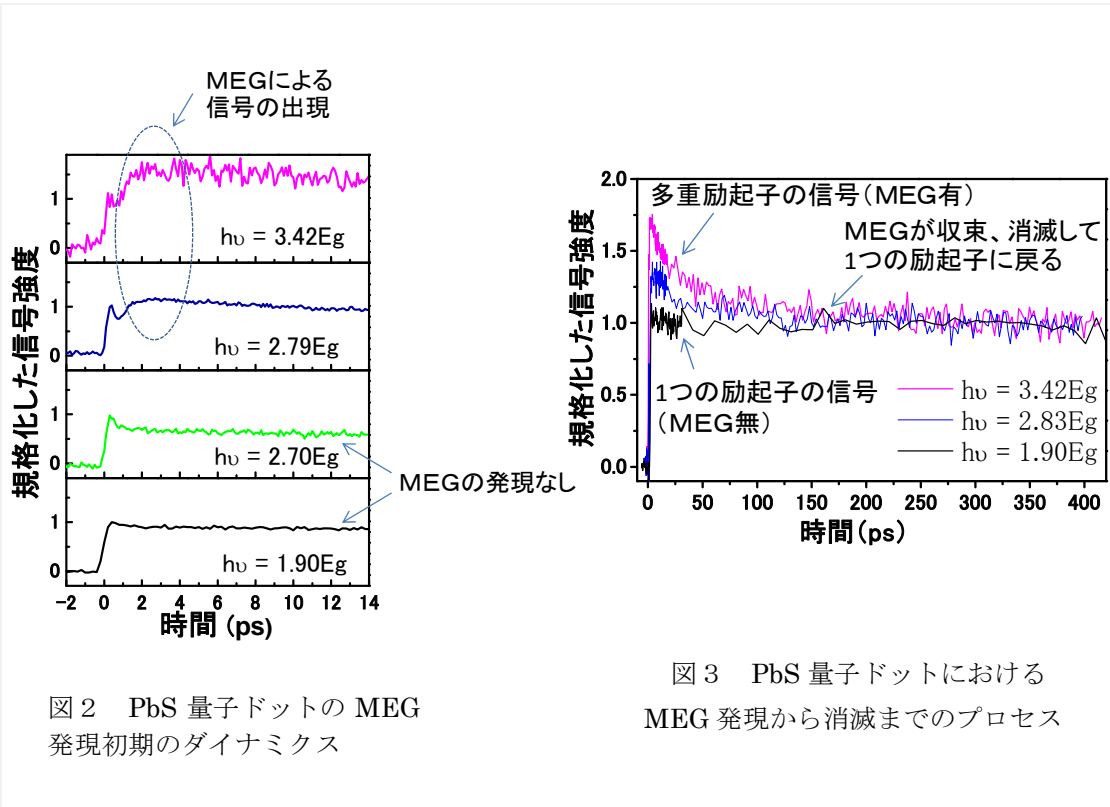
③ 量子ドット複合化の効果

TiO₂ 電極を逆オパール電極に固定し、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。これまでに、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が報告されたが、そのメカニズムはまだ解明されていなかった。本研究では、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 - 650 nm) 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。

(b) MEG の生成・緩和ダイナミクスおよび MEG 発現条件の解明 [4]

TG 法を MEG の評価手法として用いた。TG 法は、光吸収による物質の屈折率の変化を測定するため、従来の過渡吸収法では測定困難だったプロセスの検出も可能である。3 種類の異なるサイズの PbS 量子ドットを対象として、励起光のエネルギーを、MEG が発現できない小さい値 ($1.9E_g$ (E_g は量子ドットの LUMO と HOMO 間のエネルギー差である)) から MEG が十分起こりうる大きい値 ($3.4E_g$) まで変化させ、光吸収により生成した励起子の TG 信号を測定した。図 2 に示すように、励起光エネルギーが PbS 量子ドットのバンドギャップ E_g の 2.7 倍以下の場合では、TG 信号の強度が単調に減衰するが、2.7 倍以上の光エネルギーになると、最初のピーク直後 200 fs から信号が増加し、3 ps 付近で MEG 発現を示す新しいピークが現れ、そのピークの強度は光子エネルギーの増加とともに大きくなる。これは MEG が多く発現していることを示すもので、その過程を初めて観察することに成功した。さらに、図 3 に示すように、数 100 ps までの TG 応答では、励起光エネルギーが $1.9E_g$ の時に MEG が発現しておらず単一励起子に対応する遅い緩和が見られるが、 $2.7E_g$ 以上では MEG 発現による Auger 再結合に対応する速い緩和成分が見られた。生成された多重励起子は数 10 ps で消滅して 1 つの励起子に戻ったことが判明し、MEG の発現から収束までの一連の観測に成功した (図 3)。これらの結果より、PbS 量子ドットの MEG について、(1) 発現条件: 光子エネルギーが E_g の 2.7 倍より大きいこと; (2) MEG 発現のプロセス: 200 fs で開始し、3 ps 秒で終了すること; (3) 多重励起子の寿命: 数 10 ps オーダーであることが明らかになった。また ZrO_2 、 TiO_2 ナノ構造薄膜に吸着した PbS 量子ドットについても、その光励起キャリアダイナミクスと MEG の評価を行い、MEG の発現条件について検討した。その結果より、さらに MEG を利用できる太陽電池の適切なデバイス構造について考案している。



3. 今後の展開

半導体量子ドット増感太陽電池の光電変換特性向上に関しては、表面修飾、TiO₂ ナノ構造電極の表面形態、量子ドットの種類や複合化などは光励起キャリアダイナミクスと光電変換特性に強く影響することを判明した。また、TG法をMEGの評価手段として適用し、モデル材料としたPbS量子ドットにおける光励起キャリアダイナミクスを評価し、世界で初めてMEGの生成ダイナミクスの観察に成功した。PbS量子ドットのホットキャリアを利用するには、数100 fs以内に取り出す必要がある。MEGを太陽電池に利用する場合、利用できる条件は、光エネルギーが2.7E_g以上であること、また数10 ps以内に電子と正孔に電荷分離させるべきであることが判明した。さらに、薄膜電極に吸着したPbS量子ドットでも、MEGが発現できることが分かった。これらの実験結果は、定量的な基礎データとして、今後量子ドットのMEG発現を利用する太陽電池デバイス設計の明確な指針になることが期待される。

4. 自己評価

さがけ研究3年間で得られた研究成果が、量子ドットの多重励起子生成の有効利用と量子ドット増感太陽電池の光電変換機能向上に関する系統的かつ定量的な基礎データとなる。高効率かつ安価な量子ドット太陽電池の実現へ重要な基礎的な知見が得られたと信じる。

5. 研究総括の見解

沈研究者は、時間分解分光法による解析技術と量子ドット型色素増感太陽電池作製技術を有しており、半導体量子ドットにおける多重励起子生成発現と向上に関わるキャリアーキャリア相互作用とキャリアーフォノン相互作用のメカニズムを、過渡回折格子法を用いて解明すること

を提案した。本研究では、ナノ構造 TiO₂ 光電極に対して、半導体量子ドットを増感剤として適用し、①MEG 効果の発現と向上に関わるメカニズムの解明と実験条件の最適化を行い、②各ナノ接合光機能界面の改質と制御に還元し、光電変換効率の向上を目指している。

半導体量子ドットを吸着した TiO₂ 光電極系の作製に関するテーマから、光励起キャリア緩和過程の評価と多重励起子生成 (MEG) メカニズムの評価と解析、そして半導体量子ドット増感 TiO₂ 太陽電池の作製と評価に至るまで幅広く手がけ、全体として順調に研究を進展させ、半導体量子ドット中の MEG 現象の発現を明らかにした点は高く評価できる。論文、特許、プレスリリースなど成果の公表も順調に行った。具体的には、MEG 効果を太陽電池に利用する場合、利用できる条件は、光エネルギーが 2.7E_g 以上であること、また数 10 ps 以内に電子と正孔に電荷分離させるべきであることを示した。半導体量子ドット増感太陽電池において、表面修飾、TiO₂ ナノ構造電極の表面形態、量子ドットの種類等が、光電変換特性に強く影響することを系統的に調べ上げ、PbS 量子ドットにおける光励起キャリアダイナミクスを評価し、世界で初めて MEG の生成ダイナミクスの観察に成功した。このことは太陽電池の設計に有意義なデータとなる。今後、得られた知見を基に、実際に MEG 動作する太陽電池とその高効率化へ向けた研究の展開に期待する。また、他の方法と組み合わせることにより、MEG 観測のための必須の評価手法として確立し、量子ドット創生の手法と合わせて、高効率素子構造の最適化を進めてほしい。

6. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Q. Shen*, K. Katayama, T. Sawada, S. Hachiya, and T. Toyoda: Ultrafast Carrier Dynamics in PbS Quantum Dots, *Chem. Phys. Lett.*, **Vol. 542**, pp. 89–93, 2012.
2. 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. 4659–4667, 2011.
3. 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.(This paper has been selected for the January 2011 issue of Virtual Journal of Ultrafast Science.)
4. 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. (This paper has been selected for the September 27, 2010 issue of Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology.)
5. 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.

(2)特許出願

研究期間累積件数: 2件

1.

発明者: 沈青、片山建二、豊田太郎

発明の名称: 「半導体における多重励起子生成状態の評価方法」

出願人: 国立大学法人電気通信大学、学校法人 中央大学

出願日: 2011/2/22

出願番号: 特願 2011-36258

2.

発明者: 沈青、豊田太郎、大西陽平

発明の名称: 「量子ドット吸着基板及び量子ドット吸着基板の製造方法」

出願人: 国立大学法人電気通信大学

出願日: 2011/11/18

出願番号: 特願 2011-252701

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

○ 主要な学会発表:

(A) 国際学会口頭発表

- (1) Q. Shen and T. Toyoda: Semiconductor Quantum Dot Sensitized Solar Cells: Effects of Surface Modification and Photoanode Morphology on Photovoltaic Properties and Carrier Dynamics, The 68th IUVSTA Workshop: Multifunctional Surface Energy for Advanced Energy Applications (Hong Kong, China, Dec. 2012).**(Invited talk)**
- (2) Q. Shen, S. Hachiya, I. Mora-Sero, J. Bisquert, K. Katayama, and T. Toyoda: Effects of Surface Modification on Photovoltaic Property and Carrier Dynamics for Quantum Dot Sensitized Solar Cells, The 22th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC22) (HangZhou, China, Nov. 2012).
- (3) Q. Shen and T. Toyoda: Ultrafast Carrier Dynamics and Photovoltaic Property of Quantum Dot Sensitized Solar Cells, 9th International Symposium on Modern Acoustics (ISMA9) (Nanjing, China, May 2012).**(Invited talk)**
- (4) Q. Shen, K. Katayama, S. Hachiya, T. Sawada, 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 (Mallorca, Spain, Sep. 2011).
- (5) Q. Shen, K. Katayama, S. Hachiya, T. Sawada, and T. Toyoda: Hot Carrier Dynamics and Multiple Exciton Generation in PbS Quantum Dots, The 6th Aceanian Conference on Dye-sensitized and Organic Solar Cells (Beppu, Japan, Oct. 2011).
- (6) Q. Shen, S. Hachiya, K. Katayama, T. Sawada, and T. Toyoda: Photovoltaic Property and Ultrafast Carrier Dynamics in Quantum Dot Sensitized Solar Cells, Low Carbon Earth Summit (Dalian, China, 2011) **(Invited talk)**.
- (7) 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) (Australia, July 2011)

- (8) 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 (San Francisco, U.S.A, April 2011).
- (9) 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).
- (10) 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).
- (11) 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 (Jerusalem, Israel, February 2010).

(B) 国内学会口頭発表

- (1) 沈青、豊田太郎:半導体量子ドットにおける多重励起子生成と太陽電池への応用、「次世代ナノ技術に関する時限研究専門委員会」第2回研究会(2013年1月29日、東京)(招待講演)。
- (2) 沈青:半導体量子ドットにおける多重励起子生成と太陽電池への応用、高分子同友会勉強会(2012年9月10日、東京、高分子学会事務局)(招待講演)
- (3) 沈青:Dynamics of Multiple Exciton Generation in PbS Quantum Dots、日本化学会第92春季年会、(2012年3月27日、東京)。
- (4) 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)。
- (5) 沈青: PbS量子ドットの多重励起子生成の評価、日本化学会第91春季年会(2011年3月28日、東京)。
- (6) 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)(依頼講演)。

○ 著作物:

- (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, “Semiconductor quantum dot-sensitized solar cells: effects of surface modification and photoanode morphology on photovoltaic properties”, *Trends in Advanced and Organic Solar Cells*, Miyasaka T. (Ed.), (CMC, 2012), ISBN978-4-7813-0620-9.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 量子ドット太陽電池の最前線: 第2章「量子ドットの作製」、1 化学吸着法、pp. 6-25; 第3章「太陽電池への応用」、1.2 ショットキー太陽電池、pp. 76-82; 1.3 空乏ヘテロ型、pp. 84-90、豊田太郎編(シーエムシー出版、2012年)。

○ プレスリリース

2012年6月26日: JST・電気通信大学 “一つの光子が複数の励起子を生成する過程を解明” —量子ドットMEG型太陽電池の実現に期待—

<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20120626/index.html>

○ 新聞・雑誌掲載

(1) “量子ドット型太陽電池 高効率化に道筋 電通大、物理現象を解明”

【2012年7月2日 日経産業新聞】

(2) “電通大「多重励起子生成」解明、量子ドット太陽電池の高効率化に道”

【2012年6月27日 日刊工業新聞】

(3) “電通大「多重励起子生成」解明、量子ドット太陽電池の高効率化に道”

【2012年6月27日 朝日新聞デジタル】

(4) “一つ光子で複数励起子生成プロセスを解明 電通大 高効率太陽電池開発の指針に”

【2012年7月6日 科学新聞】

(5) “電気通信大学、一つの光子が複数の励起子を生成する過程を解明”

【Laser Focus World Japan 2012年7月号、p. 10】

