

令和元年6月21日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06052

研究課題名(和文) 固溶体量子ドット配列によるエネルギー傾斜構造構築と薄膜太陽電池の高効率化

研究課題名(英文) Stacking Structure-dependent Photovoltaic Performance of Multilayer Thin Films Composed of Multinary Solid Solution Quantum Dots

研究代表者

亀山 達矢 (Kameyama, Tatsuya)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：40646759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,000,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光の高効率な利用に向けて、量子ドット太陽電池の研究が活発に行われている。本研究ではZnSe-AgInSe₂などの固溶体型量子ドットの組成を変化させながら、エネルギーギャップの順に積み上げた量子ドット薄膜構造を作製した。これにより、励起子を薄膜の電荷分離界面へエネルギー移動により集約し、エネルギーギャップの勾配に沿った、励起子の集約機構による太陽電池変換特性向上を目指した。このような新しいシステムを導入し、従来の量子ドット太陽電池の問題点を解決することで、量子ドット太陽電池の高い理論変換効率に近づくことが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギー問題解決に向けて、太陽光エネルギーの効率的な利用が求められている。特に、高い理論効率が期待されている量子ドット太陽電池であるが、実デバイスとしての変換効率は低く、理論効率に近づけるための検討が求められている。本研究では、これを達成するため光合成系に似たエネルギー移動による光捕集機構を、量子ドットを配列させることにより構築することとした。薄膜太陽電池にこのようなメカニズムを導入することは新しく、学術的な興味も大きい。

研究成果の概要(英文)：Research on quantum dot solar cells is currently actively conducted around the world for the efficient use of solar energy. In this study, we changed the composition of solid solution type quantum dots such as ZnSe-AgInSe₂ and prepared the quantum dot thin film structure while controlling the arrangement of energy gap of them. As a result, excitons were collected on the charge separation interface of the thin film via energy transfer, and the photoenergy conversion efficiency were improved by the exciton collection mechanism along the gradient of the energy gap. Such a system is expected to approach the high theoretical conversion efficiency of quantum dot solar cells.

研究分野：光電気化学

キーワード：量子ドット 半導体ナノ粒子 太陽電池 エネルギー移動 近赤外応答 配列制御 ナノ構造制御 発光材料

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球表面には太陽から常に 1.3×10^{17} W もの光のエネルギーが届いており、これは人類の消費しているエネルギー (10 TW) の約 10,000 倍に相当する。エネルギー問題解決に向けて太陽光の効率的な利用が検討されており、特に太陽電池は、クリーンな発電方法として注目されている。Si 太陽電池では、研究レベルの変換効率が理論変換効率 (約 30%) に近づいており、これ以上の大幅な高効率化は期待できない。高効率な光エネルギー変換を目指して、次世代太陽電池の研究開発が国内外で活発に行われている。その候補のひとつが、約 10 nm 以下の半導体ナノ粒子 (量子ドット) を用いる量子ドット太陽電池であり、理論変換効率が 40% 以上に及びとして注目されるようになった。これは、量子閉じ込めが発現する量子ドット中では、エネルギーの大きな光子ひとつを吸収することで、複数の励起子が生成する、“多重励起子生成”効率がバルク結晶に比べて非常に大きいためである。従来は波長の短い (エネルギーの大きい) 光をデバイスが吸収し、ホットキャリアが生成しても、これらはすぐにバンド端のエネルギーまで緩和し、熱としてエネルギーを失っていた。量子ドットが、この余剰なエネルギーから新たな励起子を生成することで、無駄なく光のエネルギーが利用可能になるため、高いエネルギー変換効率が達成されると考えられている。

液相で化学合成された量子ドットは、粒径分布が非常に単分散で、原料の利用効率 (収率) も高く、大量に合成できるため、製造コストも抑えられ、量子ドット太陽電池の光吸収層に適している。多重励起子生成過程を実際に利用するためには、バンドギャップの狭い量子ドットを用いる必要がある。Nozik らは PbSe 量子ドット ($E_g=0.98$ eV) を用いた薄膜太陽電池において、 E_g の 3 倍程度のエネルギーをもつ光照射で、100% を超える外部量子収率を観測し、生成した多重励起子が回路中に取り出せることを確認した。(*Science* 334, 1530 (2011)) また Bawendi らは PbS 薄膜太陽電池で、化学合成した量子ドットの系としては最も高い 8.6% の変換効率を記録した。(*Nature Mat.*, 13, 796 (2014)) これらの太陽電池では、酸化物層 (TiO₂ や ZnO 薄膜) の上に量子ドットを製膜し、光照射で量子ドット内に生成した励起子が、酸化物層界面で電荷分離する (図 1)。電子は酸化物層 (n 型半導体) に注入され、正孔は量子ドット層 (p 型半導体) から背面電極へと移動することで効率的に発電を行う。しかし、依然として変換効率は理論効率に対して低い。この原因として、量子ドット内で励起子が失活しやすい (励起子の拡散距離が短い) ため量子ドット層の膜厚を厚くできず、入射光の十分な吸収が出来ないことが挙げられる。単一の量子ドット層内では、励起子は量子ドット膜内をランダムに移動し、偶々酸化物層界面にきたものが電荷分離する。効率的に発電を行うためには、これらの課題を解決していく必要があった。

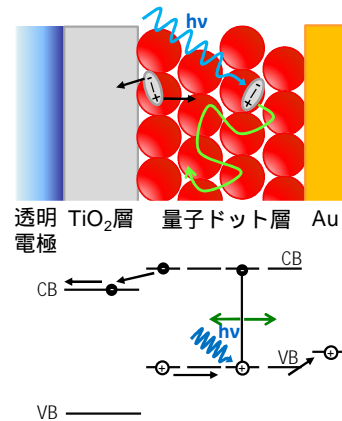


図 1 量子ドット薄膜太陽電池の模式図と発電機構。励起子が量子ドット層内をランダムに拡散し、TiO₂ 層界面で電荷分離する。

2. 研究の目的

私はこれまでに、粒径の異なる CdS 量子ドットを配列させた電極において、光照射時に生じるアノード光電流が、その積層構造に大きく影響されることを報告している (*PCCP*, 2009, 11, 5369)。粒径の異なる CdS 量子ドットは量子サイズ効果により、 E_g が変化する。これらが近接した状態では、大きな E_g を有する量子ドットから E_g の小さい量子ドットへとエネルギー移動が起こり、励起子を集約することができる。すなわち E_g の傾斜構造を構築することで、励起子を、指向性を持たせて集めることが可能になる (光捕集アンテナ効果) が発現する。そこで、これらの知見を活かして、エネルギー移動により励起子の移動方向を規制し、効率的に酸化物薄膜界面に励起子を集約することにより、先の問題点 および を解決し、量子ドット薄膜太陽電池の高効化が可能になるとの着想に至った。そこで、本研究では E_g の傾斜構造により光捕集アンテナ機能を組み込んだ量子ドット薄膜層の導入により、量子ドット薄膜太陽電池の高効率化を目指し研究を実施した。

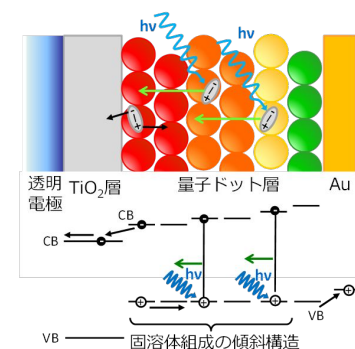


図 2 エネルギーギャップ傾斜構造を導入した量子ドット薄膜太陽電池の模式図。励起子を指向的に電荷分離界面に移動させることで、効率的な電荷分離を達成する。

3. 研究の方法

用いる量子ドットは幅広く太陽光を吸収できることから、近赤外域に E_g を有するものが良い。私はこれまでに Pb, Cd フリーの新規半導体量子ドットとして、I-III-VI₂ 族半導体を基本とした固溶体型の量子ドットを開発してきた。特に ZnSe-AgInSe₂ や固溶体量子ドットはその固溶体組成 (ZnSe と AgInSe₂ の割合) を変化させることにより、近赤外である波長 900 nm から可視域

の波長 500 nm と広い範囲で吸収端を精密に制御することに成功している。また AgInTe₂ 量子ドットは、より長波長側からの光利用を可能にする材料である。本研究ではこれらの固溶体量子ドットを用いて、組成を段階的に変化させながら積層させた量子ドット層を形成し、得られるエネルギーギャップの傾斜構造により、励起子の高効率な電荷分離を目指した(図2)。以下に示す3項目を行った。

(1) 組成の異なる量子ドットの集積構造形成と集団的な光機能性の発現： E_g の異なる(化学組成の異なる)量子ドットを用意し、ガラス基板に E_g の順に配列させた構造を構築する。官能基を両端にもつジチオールなどをリンカー分子として、透明電極上に量子ドットを積層する手法を確立した。得られた構造体の発光スペクトルや寿命測定から、固溶体量子ドット積層構造の光捕集アンテナとしての機能を評価した。

(2) 量子ドット集積型薄膜太陽電池の作製：(1)の検討で得られた最適な構造体を用いて、実際に素子を作製し、集約した励起子の電極表面での電荷分離を行った。酸化物膜上に固溶体量子ドット集積体を形成させ、電極を取り付けることで太陽電池素子とした。界面へと励起子が集まるように設計した膜を用いて、実際に太陽電池特性を評価しながら構造の有用性を評価した。

(3) 量子ドットのナノ構造制御と探索：(2)までに得られた知見に基づいて、これに用いるべき新規量子ドットを探索すべく合成を試みた。

4. 研究成果

(1) 組成の異なる量子ドットの集積構造形成と集団的な光機能性の発現

酢酸銀、酢酸インジウムおよび酢酸亜鉛とセレノウレアを、オレイルアミン中 250 °C で 10 分間加熱することにより、ZnSe-AgInSe₂ 量子ドットを合成した(組成比(AgIn)_xZn_{2(1-x)}Se₂ 中の x を用いて ZAlSe(x)と表記する)。これらのナノ粒子は、近赤外から可視光領域にブロードに広がる吸収帯をもち、それが x の減少にともなってブルーシフトした。このように、ZAlSe 量子ドットは組成の制御により自在にエネルギー構造を制御することができる。さらに、石英基板もしくは FTO 電極作製した ZnO 薄膜上に、ディップコート法を用いて、1,2-エタンジチオールを架橋剤として ZAlSe 量子ドットを積層させた(Substrate/ZAlSe(x))と表記する)。

固溶体組成比の異なる二種類の ZAlSe 量子ドット(ZAlSe(0.75)、ZAlSe(0.25))を用い、石英基板上にディップコートを 5 回繰り返すことで粒子を積層した。吸収スペクトルにおいて、ZAlSe QDs の積層操作ごとにほぼ等しい吸光度の増加がみられたことから、基板上に均一な薄膜が形成されたことが示唆された。得られた ZAlSe 膜の、365 nm 励起光照射下での発光スペクトルを図3に示す。いずれの組成の ZAlSe 粒子を積層させた場合にも、欠陥準位からのブロードな発光が観察された。一方、組成の異なる ZAlSe QDs を 5 サイクルずつ積層した膜(Quartz/ZAlSe(0.75)/ZAlSe(0.25))の発光スペクトルは、これら単独の ZAlSe QDs 膜の発光スペクトルの重ね合わせとは大きく異なった。ZAlSe(0.25)由来の発光が 58% 消光し、ZAlSe(0.75)由来の発光強度は 170% に増大した。このことは、 E_g の大きな ZAlSe(0.25) (E_g : 2.07 eV) から、 E_g のより小さな ZAlSe(0.75) (E_g : 1.47 eV) へと励起エネルギー移動が生じることを示し、膜内での異方性をもったエネルギー集約機構が形成されたことを示す。このとき、発光寿命を測定すると、単独で積層した膜と比較して、複合化したものでは、そのドナーの平均発光寿命が半分程度に減少し、エネルギー移動が効果的に起こっていることが確認された。

ゾルゲル法で作製した、ZnO 薄膜上に積層した ZAlSe 積層膜電極を、0.1 mol dm⁻³ LiClO₄ および 0.1 mol dm⁻³ トリエタノールアミンを含むアセトニトリル溶液に浸漬し、可視光照射下 ($\lambda > 420$ nm) で光電気化学特性を評価した。ZnO 薄膜電極上に、組成の異なる ZAlSe QDs 積層膜を 5 層ずつ、異なる順序で積層した電極を作製し、正孔捕捉剤としてトリエタノールアミンを含むアセトニトリル溶液中にこの電極を浸漬させ可視光 ($\lambda > 420$ nm) を照射したところ、-0.3 ~ -0.1 V vs. Ag/AgCl よりも正の電位を印加した場合に、いずれもアノード光電流が観測された(図4)。このことは、ZAlSe QDs 中に光励起した電子が ZnO の伝導帯に移動したことを示す。一方で、光電流値は積層構造に大きく依存し、電極近傍

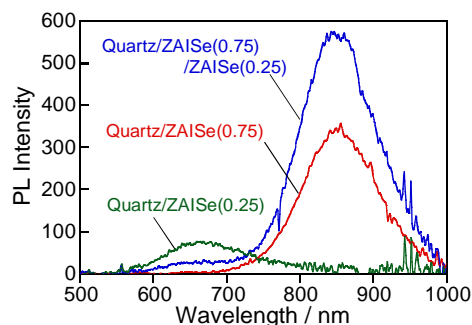


図3 ZAlSe 量子ドット積層膜の発光スペクトル(励起光 365 nm)

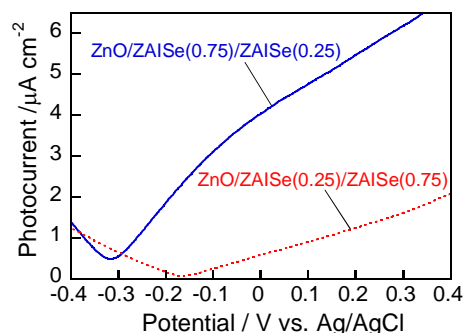


図4 積層構造に依存した光アノード電流生成。

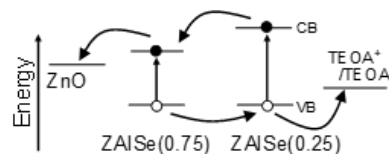


図5 E_g 勾配による効率的なアノード電流取り出し

に E_g のより小さい $ZnO/ZnSe(0.75)$ を積層した膜では、逆の積層構造を有する膜に比べて約 3 倍大きなものとなった。これは、粒子中に光生成した励起電子・正孔の移動方向が、 $ZnO/ZnSe$ QDs 積層膜中の E_g の勾配により決まるためである。このように、 E_g の異なる半導体ナノ粒子の積層構造を制御することで、得られた光電極の光電変換特性を向上させることが可能であった(図 5)。

さらに、興味深いことにこれらの二種類の $ZnO/ZnSe$ 量子ドット溶液を、あらかじめ混合した膜の発光スペクトルを測定したところ、より大きなエネルギー移動にともなう発光増強が観察された(200%)。その一方で、同様の膜構造を導入した電極の光電流を観測すると、逆に積層構造より光電流が減少した。発光の場合二種類の量子ドットが近接することで、エネルギー移動がより高効率に起こるようになり、発光増強が大きくなる。しかし、電流として取り出す場合には、 ZnO 界面にて電荷分離が起こるため、ランダムにエネルギー移動する構造では、効率が悪くなる結果となったものと考えられる。

(2) 量子ドット集積型薄膜太陽電池の作製

前項までで、傾斜を持った量子ドット積層構造が、光エネルギーの集約に効果的であり、光エネルギー変換に寄与することが明らかとなった。ここでは、このようにして得られた薄膜を実際の薄膜太陽電池素子として用いることを検討した。

(1)と同様にして、透明電極(ITO)上に $ZnO/ZnSe(x)$ 薄膜を作製した。さらに、PEDOT:PSS 溶液をスピンコート法により塗布し、大気中において 90 ° で 30 分間加熱することにより乾燥させた。その後、熱蒸着により約 50 nm の金対極を作製し、太陽電池セルを作製した(図 6)。またこのときの、エネルギー準位の相関を図 7 に示す。

薄膜の断面 SEM 像から、その厚さは用いる粒子によらず、およそ 250 nm 程度であった。この薄膜を用いて、上記の方法により薄膜太陽電池を作製した。作製した素子は、擬似太陽光照射下(AM 1.5G)で、光起電力を生じた(図 7 挿入図: $ZnO/ZnSe(0.75)$ の I-V 曲線)。短絡電流における作用スペクトル(図 8)からは、吸収スペクトルに対応して、 $ZnO/ZnSe(0.75)$ では 900 nm、 $ZnO/ZnSe(0.25)$ では 650 nm より短波長側における光応答が見られた。この時の IPCE 値はとても小さいものであったが、 $ZnO/ZnSe$ QDs 層が光活性層として作用していることが確認された。

この段階での $ZnO/ZnSe(0.75)$ 薄膜を用いた場合の変換効率は $3.9 \times 10^{-3} \%$ 程度であり、特に電流値の取り出し効率が悪いことが問題となった。得られた薄膜の赤外吸収スペクトルからは、用いた配位子(1,2-エタンジチオール)のアルキル基に由来するピークが強く表れており、これらが量子ドット間に存在することで、ドット間距離を増大させ移動を妨げているものと考えられた。そこで、積層後の薄膜を減圧下、180 ° で加熱することで、配位子を揮発させ取り除き、変換効率を向上させることを試みた。赤外吸収スペクトルから、配位子由来のシグナルの減少と、インピーダンス解析により、 $ZnO/ZnSe$ 量子ドット界面の電荷移動抵抗が加熱により 1/4 程度まで減少したことを確認した。これらの改善により、 $ZnO/ZnSe(0.75)$ 薄膜を用いた場合の変換効率は $4.2 \times 10^{-2} \%$ と 10 倍程度向上した。しかし、短絡電流値が $\mu A \text{ cm}^{-2}$ オーダーと小さいことが課題として残る。実用デバイスでは数パーセントから十数パーセント程度の変換効率を得る必要があり、今後も粒子間の励起子やキャリアの移動を、大幅に改善させる検討を続けていく。

電流値の取り出し効率が低い課題が残るが、組成の異なる粒子を積み上げた薄膜における、積層構造に依存した素子の光電変換特性についても検討した。短絡状態で測定した作用スペクトルからは、その光応答が積層構造に依存して大きく変化している様子が確認された。特に ZnO 側に E_g が小さくなる傾斜を持たせた場合 ($ZnO/ZnSe(0.75)/ZnSe(0.25)$) には、 $ZnSe(0.75)$ による 900 nm から立ち上がる応答が見られたのに対し、その逆構造ではこの量子ドットからの応答が観測されず、 $ZnSe(0.25)$ のみの応答が見られた。この結果

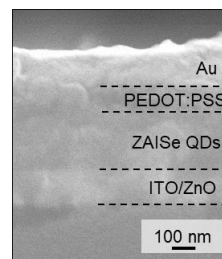


図 6 $ZnO/ZnSe$ 量子ドット積層薄膜太陽電池の断面 SEM 像。

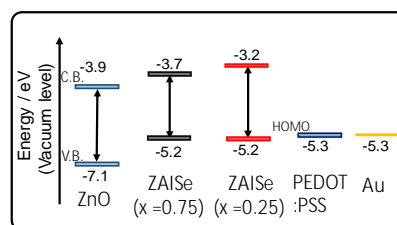


図 7 $ZnO/ZnSe$ 量子ドット積層薄膜太陽電池のエネルギー準位の相関。

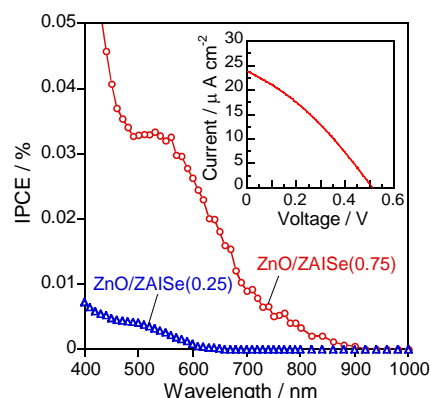


図 8 単独で積層した $ZnO/ZnSe$ 量子ドット積層薄膜太陽電池の光電流作用スペクトル。挿入図は $ZnO/ZnSe(0.75)$ の I-V 曲線。

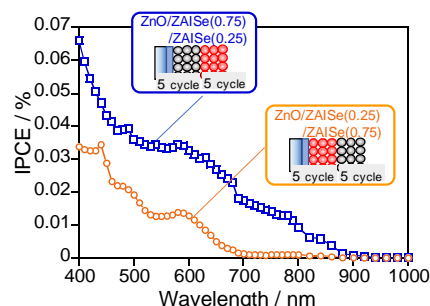
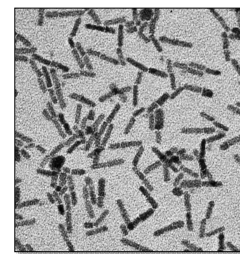


図 9 異なる組成の粒子を積層させた $ZnO/ZnSe$ 量子ドット積層薄膜太陽電池の作用スペクトル。

自体は(1)で溶液中にて観測された光電流増強と同じメカニズムで説明でき、 E_g の傾斜を電荷分離界面(ZnO界面)に向かうように構築することで、光電流の取り出しをスムーズに行うことができるというコンセプトが薄膜太陽電池においても実験的に示された。

(3) 量子ドットのナノ構造制御と探索

これまでに、新規近赤外発光ナノ粒子として $AgInTe_2$ ナノ粒子を液相化学合成し、波長 1100 nm 付近で発光量子収率約 18% の比較的鋭い発光ピークを示すことを報告した。一方、 $AgInTe_2$ などの I-III-VI₂ 族半導体は、結晶構造の良く似た II-VI 族と固溶体を形成し、その固溶体組成比を制御することで、 E_g を連続的に変化させることが可能である。前述の $ZnSe-AgInSe_2$ と同様に、 $ZnTe-AgInTe_2$ 量子ドットを合成出来れば、より近赤外からの連続的な光エネルギー集約構造が構築できると期待される。そこで、ここでは近赤外光領域において、組成に応じて E_g の制御が可能であると期待される、 $ZnTe-AgInTe_2$ 固溶体 ($(AgIn)_xZn_{2(1-x)}Te_2$, ZAI_{Te}) ナノ粒子を合成し、粒子組成が発光特性や光電気化学特性に及ぼす影響を評価した。



50 nm

図 10 ZAI_{Te} 量子ドットの TEM 像。

金属元素の仕込み比を変化させて合成した ZAI_{Te} ナノ粒子は x の値によらず、およそ長さ 16 nm、幅 4 nm のロッド形状であった(図 10)。得られた粒子の吸収スペクトル(図 11a)の立ち上がり波長は、組成 x の減少によって 1030 nm から 760 nm へと短波長シフトした。発光ピーク波長も同様に短波長シフトした。吸収スペクトルにはエキシトンピークに帰属できる吸収の肩が見られ、その波長と発光ピーク波長との差(ストークスシフト)は、いずれの粒子組成でも非常に小さい。このことは、 ZAI_{Te} 粒子の示す発光がバンド端発光であることを示す。しかし、 x が 0.25 まで減少すると、バンド端発光ピークよりも長波長側に、強い欠陥発光が観測され、バンド間に放射性再結合中心となる準位が生じたことが示唆された。

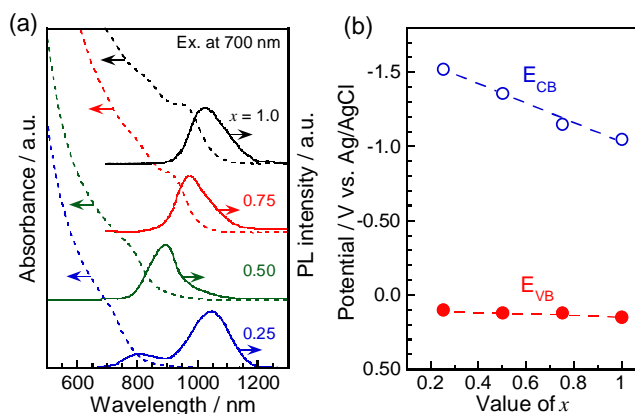


図 11 (a) ZAI_{Te} 量子ドットの吸収・発光スペクトル。(b) ZAI_{Te} 量子ドットのエネルギー電子エネルギー準位。

しかし、 x が 0.25 まで減少すると、バンド端発光ピークよりも長波長側に、強い欠陥発光が観測され、バンド間に放射性再結合中心となる準位が生じたことが示唆された。

ZAI_{Te} ナノ粒子を担持した ITO 電極に光照射をすると、いずれの固溶体組成の粒子においてもカソード光電流を生じ、p 型半導体類似の特性を示した。カソード光電流の立ち上がり電位を価電子帯上端 (E_{VB}) と仮定し、 E_g を差し引くことで、伝導帯下端 (E_{CB}) を算出し、 ZAI_{Te} ナノ粒子の電子エネルギー構造を求めた。 x が減少するにつれて E_{CB} は負側へ変化したが、 E_{VB} はほぼ一定の値となった(図 11b)。 ZAI_{Te} ナノ粒子は、固溶体組成比を制御することでその吸収・発光特性と電子エネルギー構造を制御可能であり、発光材料や太陽電池の光吸収材料への利用が期待される材料といえる。 ZAI_{Se} 量子ドットなどと組み合わせることで、より広いエネルギー領域において、 E_g の傾斜構造を構築させることに寄与する材料であると言える。

また、より効率的な電荷分離を実現し、高効率な太陽電池を作製するため、本研究で見えてきた量子ドットの改良点としては、粒子間での電荷移動抵抗を小さくすることが挙げられる。これらについても、量子ドットを直接ヘテロ接合させた粒子の開発を行っており、現在はここで開発した量子ドットを適用した量子ドット薄膜太陽電池の構築の検討をしている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

- (1) T. Kameyama, K. Sugiura, Y. Ishigami, T., Yamamoto, S. Kuwabata, T. Okuhata, N. Tamai, T. Torimoto, "Rod-shaped Zn-Ag-In-Te nanocrystals with wavelength-tunable band-edge photoluminescence in the near-IR region", *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6, 13705-13715. 査読有
- (2) T. Kameyama, "Advances in Colloidal I-III-VI₂-Based Semiconductor Quantum Dots toward Tailorable Photofunctional Materials" *Electrochemistry*, 2018, 86, 291-297. 査読有
- (3) T. Kameyama, S. Koyama, T. Yamamoto, S. Kuwabata, T. Torimoto, "Enhanced Photocatalytic Activity of Zn-Ag-In-S Semiconductor Nanocrystals with a Dumbbell-Shaped Heterostructure", *Journal of Physical Chemistry C*, 2018, 122, 13705-13715. 査読有

[学会発表](計 14 件)

- (1) 亀山達矢, "近赤外発光する新規半導体量子ドットの開発とその発光波長制御", 第 36 回

- 無機材料に関する最近の研究成果発表会, (2019) (招待講演)
- (2) T. Kameyama, S. Koyama, T. Yamamoto, S. Kuwabata, T. Torimoto, “Photocatalytic H₂ Evolution Activity of Dumbbell-shaped Nanocrystals Composed of ZnS-AgInS₂ Solid Solution”, Materials Challenges in Alternative and Renewable Energy 2018, (2018) (招待講演)
 - (3) 亀山達矢, 小山晟也, 桑畑 進, 鳥本 司, “ZnS-AgInS₂ ナノ粒子へのヘテロ接合界面導入と光触媒活性への影響”, 第 37 回固体・表面光化学討論会, (2018)
 - (4) 鵜飼 元貴, 亀山 達矢, 桑畑 進, 鳥本 司, “ZnSe-AgInSe₂ 固溶体量子ドット積層薄膜太陽電池の光電変換特性” 2018 年電気化学秋季大会, (2018)
 - (5) G. Ukai, T. Kameyama, S. Kuwabata, T. Torimoto, “Stacking Structure-dependent Photovoltaic Performance of Multilayer Thin Films Composed of ZnSe-AgInSe₂ Solid Solution Quantum Dots”, 10th Asian Photochemistry Conference (2018)
 - (6) T. Kameyama, S. Koyama, T. Yamamoto, S. Kuwabata, T. Torimoto, “Controlling Chemical Composition of Dumbbell-Shaped ZnS-AgInS₂ Nanocrystals for Efficient Photocatalytic Hydrogen Evolution”, 10th Asian Photochemistry Conference, (2018)
 - (7) T. Kameyama, K. Sugiura, Y. Ishigami, T. Yamamoto, S. Kuwabata, T. Okuhata, N. Tamai, T. Torimoto, “Preparation of Low-Toxic Zn-Ag-In-Te Quantum Dots with Tunable Near-IR Emission Toward Optical Applications”, The 5th Optical Manipulation Conference, (2018)
 - (8) 亀山達矢, “高度な光利用を可能にする低毒性半導体量子ドットの開発”, 電気化学会第 85 回大会, (2018) (招待講演)
 - (9) 鵜飼元貴, 亀山達矢, 桑畑進, 鳥本司, “ZnSe-AgInSe₂ 固溶体量子ドット固定電極の集積構造制御と光電変換特性向上”, 電気化学会第 85 回大会, (2018)
 - (10) T. Kameyama, “Preparation and Photoelectrochemical Properties of Low-Toxic Ag-based Quantum Dots for Photoenergy Conversion System” Asia International Symposium in CSJ, 2018 (招待講演)
 - (11) 鵜飼元貴, 亀山達矢, 桑畑進, 鳥本司, “ZnSe-AgInSe₂ 固溶体量子ドットの配列構造化による 励起エネルギー捕集と光電変換特性の向上”, 2017 年電気化学秋季大会, (2017)
 - (12) T. Kameyama, K. Sugiura, S. Kuwabata, T. Torimoto, “Composition Dependent Photoluminescence of ZnTe-AgInTe₂ Solid Solution Nanocrystals in Near-Infrared Light Region”, IMSE 2016, (2016) (招待講演)
 - (13) T. Kameyama, K. Sugiura, S. Kuwabata, T. Torimoto, “Photoluminescence and Photoelectrochemical Properties of ZnTe-AgInTe₂ Solid Solution Nanocrystals”, PRiME 2016, USA (2016)
 - (14) T. Kameyama, Y. Ishigami, S. Kuwabata, T. Torimoto, “Size-Controlled Synthesis of Near-IR-Light-Emitting AgInTe₂ Nanocrystals for Biological Imaging”, 220th ECS Meeting, (2016)

[その他]

ホームページ等

<http://www.apchem.nagoya-u.ac.jp/06-K-6/torimoto/index.html>

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、研究者個人に帰属されます。