

令和 4 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02534

研究課題名（和文）赤外光電変換の高効率化に向けたナノヘテロ界面構造制御

研究課題名（英文）Nano-heterointerface engineering for high efficiency infrared photovoltaics

研究代表者

久保 貴哉（Kubo, Takaya）

東京大学・先端科学技術研究センター・特任教授

研究者番号：10447328

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：透明導電性基板上的ZnOナノワイヤ(NW)を包埋するように、PbSコロイド量子ドットを充填して混合活性層を作製し、その上にAu電極を成膜した太陽電池の赤外分光感度の向上を目指し、混合活性層の電子構造の解明、高品質化を行った。本太陽電池が高赤外分光感度や高耐久性を有する要因として、ZnO NW中の電子が、Au電極に拡散できないエネルギー障壁を有する電子構造であることを明らかにした。電荷輸送に影響するZnONWの欠陥や電子格子相互作用を発光分光法で調べ、酸素下500℃の熱処理が欠陥低減に有効であることを明らかにした。混合活性層を活用することで、非鉛系赤外吸収ナノ結晶を用いたセルの高効率に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化対策の一つとして、太陽光発電の大規模導入が急務であり、既存の設置環境に加え、車輦など設置面積の制約が強い用途にも、普及させなければならない。これを実現するためには、単接合セルの理論限界(約30%)を凌駕する超効率太陽電池を安価に作製することが不可欠である。コロイド量子ドットは、合成条件を整えると、太陽光スペクトルのほぼ全領域を吸収できるようになる。また、低コストの低温溶液プロセスでのセル作製が可能であり、超高効率と低コストの両立を目指した次世代太陽電池の有望な材料である。本研究成果は、これらの有望な材料で超効率太陽電池を構築するための、基礎科学を提供すること。

研究成果の概要（英文）：To improve the infrared spectral sensitivity of a solar cell in which a mixture active layer is prepared by filling PbS colloidal quantum dots to completely encapsulate ZnO nanowires (NWs) on a transparent conductive substrate and an Au electrode is deposited on top of it. The electronic structure of the mixed active layer was clarified and its quality was improved. As a factor for the high infrared spectral sensitivity and high durability of this solar cell, we elucidated that the electronic structure of the mixture active layer has an energy barrier that prevents electrons in the ZnO NWs from diffusing to the Au electrode. Defects of ZnO NWs and electron-lattice interactions that affect carrier transport were investigated by emission spectroscopy, and it was found that annealing at 500 °C under oxygen is effective in reducing defects. By utilizing mixed active layers, we succeeded in achieving high efficiency in solar cells using infrared absorbing nanocrystals.

研究分野：太陽電池、低次元材料

キーワード：太陽電池 赤外光電変換 量子ドット ワイドギャップ半導体 ナノ構造材料 低次元材料

1. 研究開始当初の背景

地球規模での深刻化する環境問題の解決に向け、太陽光発電の大規模導入が急務であるが、太陽電池の既存設置環境に加え、車輛など設置面積の制約が強い用途にも、太陽光発電を普及させなければならない。これを実現させるためには、最も普及が進むシリコン太陽電池などの単接合セルの理論限界(約 30%)を凌駕する超効率太陽電池を安価に作製することが不可欠である。コロイド量子ドット(CQD)は、合成条件を整えると、太陽光スペクトルのほぼ全領域を吸収できるようになる。また、低コストの低温溶液プロセスでのセル作製が可能であり、超効率と低コストの両立を目指した次世代太陽電池の有望な材料である。PbS CQD と ZnO や TiO₂ を組み合わせたヘテロ接合太陽電池が最も研究がなされており、2017 年には変換効率も 12%を超え、さらなる高効率化が進んでいる。CQD を用いた太陽電池の研究開発は、米国やカナダがけん引しており、日本は出遅れた分野であった。

2. 研究の目的

高効率な ZnO/PbSQD ヘテロ接合太陽電池の代表的な構造は、透明導電性基板上的 ZnO 緻密層を形成し、その上に光吸収層をヨウ素リガンド PbSQD(I-PbSQD)で作製し、さらに EDT(エタンジチオール)リガンドと有する PbS 量子ドット(EDT-PbSQD)を電子ブロッキング層として配置し、最後に Au 電極を蒸着した構成である(以下、平坦型セル、図 1(a))。一方、本検討では、透明導電性基板上的 ZnO ナノワイヤを完全に包埋するように、PbS コロイド量子ドットを充填して混合活性層を作製し、その上に Au 電極を成膜した太陽電池構造をしている(図 1(b))。このような混合活性層を導入することで、混合層内での光励起された電子正孔対の電荷分離の促進と、空間分離されたキャリア輸送経路が実現でき、混合層の厚膜化を可能にできるため(H.Wang et al., J. Phys. Chem. Lett., 4, 2455 (2013))、光吸収の弱い赤外領域での高効率光電変換が見込める。しかしながら、赤外領域に励起子吸収を示すコロイド量子ドットと ZnO ナノワイヤの混合活性層およびそれを含む太陽電池のキャリア輸送特性に関連した電子構造の理解が十分ではない。

本研究で、溶液プロセス適合性が高いコロイド量子ドットの多彩な光電子物性を利用し、超効率太陽電池のボトムセルに資する赤外高効率光電変換素子を実現するために、キャリア物性やバンド構造に関する学術基盤を構築することである。具体的には、2 μm 帯から光電変換を行う太陽電池の第一励起子吸収位置(1.8 μm)の内部量子収率を可視域と同程度とすることを目的とした。

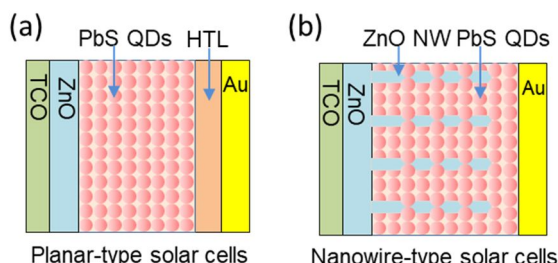


図 1. コロイド量子ドット/ZnO ヘテロ接合太陽電池の構造
(a)平坦型セル、(b)ナノワイヤ型セル

3. 研究の方法

本研究では、赤外分光感度の向上を目指し、バルクヘテロ混合層を有する PbSQD/ZnO 太陽電池のキャリア輸送挙動に関わる混合層の役割、PbSQD と ZnO ナノ構造の高品質化の方向性など、太陽電池の高効率化に関わる基礎検討を行った。主な研究項目とそれぞれの研究方法を以下に示す。

ZnO/量子ドットのバルクヘテロ構造構築と電子構造の検討

赤外領域に励起子吸収を示すコロイド量子ドットと ZnO ナノワイヤの混合活性層および、それを含む太陽電池のキャリア輸送特性に関連した電子構造の理解を深めるために、セルの断面ポテンシャルの計測を試みた。2 μm 程度の太陽電池断面寸法を数十 nm 程度の空間分解能でポテンシャル計測が可能な表面電位顕微鏡に着目し、ヘテロ接合界面の直接的なポテンシャル評価を行った。まず、太陽電池セルの断面のポテンシャルを測定するためには、ナノメートルレベルでの表面の平滑性が求められる。そこで、太陽電池を樹脂に包埋した後、低温でイオンミリング加工することにより、平坦なセル断面を作製した。次に、透明導電性基板のみ接地し、透明導電性基板から Au 電極に向かってセル断面の表面ポテンシャルを、暗状態と光照射状態の 2 通りで測定した(図 2)。

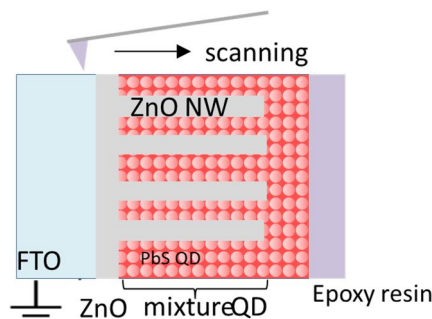


図 2. KFM によるセル断面評価イメージ

PbSQD 固体膜の高品質化によるキャリア輸送特性の改善

PbSQD 固体膜の形成過程で、リガンド交換は最も重要なプロセスの一つである。われわれは通常、コロイド量子ドットを基板に塗布した後に、固体膜状態でリガンド交換を行っている。一方、コロイド溶液中であらかじめリガンド交換を行ってから量子ドット層を成膜する方法（液相交換法）で調製した量子ドットインクを用いて成膜すると、PbSQD 膜の欠陥を低減できることが報告されている。そこで、まずは報告例の多い $1\ \mu\text{m}$ 付近に励起子吸収ピークを有する PbS 量子ドットで液相交換法を用いて、平坦型 PbSQD/ZnO ヘテロ接合太陽電池を作製した（図 1 (a)）。

オレイン酸(OA)リガンド PbS 量子ドットのオクタン溶液に、 PbI_2 と PbBr_2 の酢酸アンモニウムを含む DMF 溶液に混合し、液相状態で OA リガンドを I リガンドに交換し、ブチルアミンに再分散して、量子ドットインクを調製した。太陽電池は、以下の要領で作製した。ZnO 緻密膜 ($0.05\ \mu\text{m}$) を F-doped SnO_2 基板上に成膜し、さらに、スピンコート法で、I リガンド PbS 量子ドット層 ($0.3\ \mu\text{m}$) を形成した。この段階で、5 種類の温度(未処理, 60, 80, 100, 120, 140)で 10 分間大気雰囲気中で熱処理を行った。さらに、EDT リガンド PbSQD 層 ($0.15\ \mu\text{m}$) と Au 電極を順次積層し、太陽電池を作製した。

ZnO ナノワイヤの高品質化によるキャリア輸送特性の改善

水熱合成法で成長させた ZnO ナノワイヤのバンドギャップ内の欠陥準位や局所構造について蛍光やラマン散乱分光手法で評価し、キャリア輸送や太陽電池特性に与える影響を明らかにした。ZnO の可視光発光に関する先行研究を参考にし、欠陥由来の複数の PL 発光をガウス関数で近似し、可視領域の発光スペクトルを波形分離することで、異なる欠陥準位由来の相対的な PL 強度を見積もり、キャップ内欠陥準位の目安とした。また、ZnO ナノワイヤのラマン散乱分光法により各種赤外振動モードを評価し、局所的な構造秩序や電子格子相互作用を検討した。

赤外コロイド量子ドットヘテロ接合太陽電池の構築と高性能化

高効率赤外光電変換を実現するために、 $1.75\ \mu\text{m}$ 付近に吸収端を有する PbSQD をホットインジェクション法で合成した。また、ZnO ナノワイヤの欠陥低減、光取り入れ側の透明導電性膜の赤外透過性改善などを行い作製したセルの赤外領域における外部量子収率を検討した。

4 . 研究成果

バルクヘテロ混合層を有する PbSQD/ZnO 太陽電池のキャリア輸送挙動に関わる混合層の役割、PbSQD と ZnO ナノ構造の高品質化の方向性など、太陽電池の赤外高効率化に関わる基礎検討を行った。

太陽電池が高い赤外分光感度を有する要因として、電荷分離後の ZnO NW 中の電子が、Au 電極側に拡散できないエネルギー障壁を有する電子構造であることを明らかにした(項目)。キャリア輸送挙動に影響する ZnONW の欠陥や電子格子相互作用の強さを発光分光法で評価し、酸素下 500 のアニール処理が、光電変換特性に強く影響する酸素空孔欠陥低減に有効であることを明らかにした(項目)。PbSQD 固体膜を成膜する際に、リガンド交換法や固体膜のアニール条件を検討することで、膜の緻密化と低欠陥化が促進することを、複素インピーダンス法を用いて明らかにした。結果として、光電変換特性の向上を達成した(項目)。本研究で目指した赤外分光感度特性の向上については、当初目標とした波長 ($1.8\ \mu\text{m}$) よりも短波長であるが、 $1.6\ \mu\text{m}$ では、研究開始時と比較して赤外外部量子収率を 2 倍にすることができた(項目)。混合活性層の研究成果を活用し、非鉛系赤外吸収ナノ結晶の高効率に成功した(発表論文: X. Yun et al., *ACS Appl. Materials & Interfaces*, 2021, **13**, 3969)。

以下に各項目の成果の詳細を示す。

ZnO/量子ドットのバルクヘテロ構造構築と電子構造検討

セルの断面(図 2)のポテンシャルプロファイルより、透明導電性薄膜領域では V (暗状態と照射状態のポテンシャル差)は、ほぼ一定か微増であり、ZnO/QD のバルクヘテロ構造内部では、Au 方向に向かって緩やかに増加し、バルクヘテロ構造とキャッピング層との界面近傍で、ポテンシャルが大きく変化している(図 3)。このことから、バルクヘテロ層/キャッピング層界面に光励起されたキャリアがたまっていることが示唆される。つまり、バルクヘテロ層の QD 領域で光励起された電子正孔は、速やかに電荷分離を起こし、電子が ZnO に移動すると、ZnO の伝導帯下端と PbSQD からなるキャッピング層の伝導帯下端との間のエネルギー差が障壁となり、電子が Au 電極側に拡散できない状態になっている。一方、正孔の輸送経路であるバルクヘテロ層とキャッピング層は同一の PbSQD からなるため、Au 電極への拡散障壁が無く移動できることが理解できる。以上より、バルクヘテロ接合層では、キャッピング層(オーバーコート層)が、ZnO 中の電子に対してブロッキング層(正孔輸送層)として機能していることを明らかにした。

このような電子構造とすることで、シンプルなセル構造にできる以外に、高耐久化に寄与することも明らかになった。一般に高効率なコロイド状 PbSQD ヘテロ接合太陽電池では、EDT(エタンジチオール)リガンドと有する PbSQD(EDT-PbSQD)を積層した電子ブロッキング層が必要である(図1(a))。しかしながら、長期安定性が不安視されており、新規電子ブロッキング層の探索研究が行われている。われわれは、通常のセル(バルクヘテロ層とキャッピング層のみ)と、EDT-PbSQD 電子ブロッキング層を挿入したセルで、大気中放置長期安定性評価を実施し、混合活性層のみを使ったセルの優位性を確認することができた(図4)。本研究成果は、簡便な構造で、高効率と高耐久性を両立できる太陽電池構造への展開が期待できる。

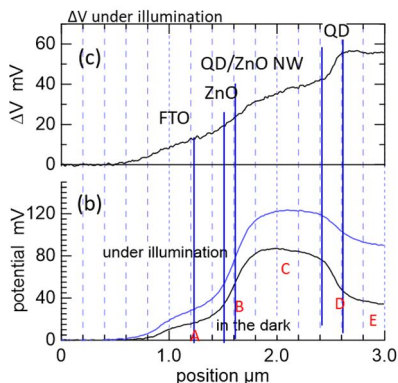


図 3. セル断面積層方向の表面ポテンシャルプロファイル

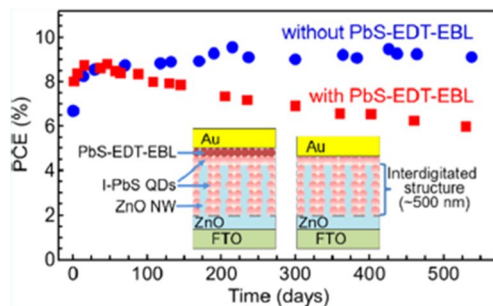


図 4. EDT 電子ブロッキング層の有無によるセルの耐久性の違い

◆ 発表論文: H. Wang et al., *ACS Applied Energy Materials* 2021 4 (6), 5918-5926.

PbSQD 固体膜の高品質化によるキャリア輸送特性の改善

量子ドットインクより QD 層を成膜した後に、異なる温度で熱処理を行いセルを作製した。熱処理温度の異なる PbSQD 層で作製した太陽電池の電流電圧特性を評価したとこと、短絡電流密度(J_{sc})、開放電圧(V_{oc})、曲線因子(FF)はいずれも、熱処理温度が 80 付近まで改善し、120 以上では、減少した(図5)。結果として、疑似太陽光照射下のエネルギー変換効率は、80 熱処理で、10.8% ($V_{oc} = 0.613$ V, $J_{sc} = 28.0$ mAcm⁻², FF = 0.626)に達した。

太陽電池のキャリア拡散や移動度も 80 付近で最大になることが分かった。この時、QD 層の欠陥密度は、未加熱セルの半分程度の 2.6×10^{17} cm⁻³eV⁻¹に減少した。

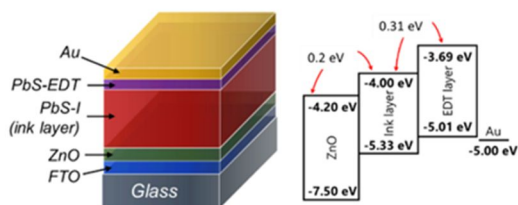
赤外振動分光法より明らかに、成膜直後には PbSQD 固体膜中にブチルアミンが残留しており、熱処理温度の上昇と共に、残留量が減少することで、膜欠陥の低減に繋がったものと考えられる。一方、固体膜の表面 SEM 観察および AFM による表面プロファイル観察より、熱処理温度が 80 付近までは、緻密化し平坦性が高まるが、高温領域では、QD が凝集し、微小粒界が形成されることが分かった。

以上より、熱処理による欠陥密度の減少と固体膜の緻密化がキャリア輸送を改善すること、粒界形成によるキャリア輸送の抑制が、バランスしたことで、80 付近で光電変換特性が最大となったものと考えられる(図5)。この時、キャリア拡散長は 0.43 μm 程度となった。そこで、キャリア拡散長と同等の PbSQD 層(0.43 μm)で太陽電池作製を行ったところ、11.3%のエネルギー変換効率を達成した。

液相リガンド法で調製した量子ドットインクの考え方を、ナノワイヤ型太陽電池に応用した。現状では、ZnONW の間隙を低部まで均一に充填することができていない。量子ドットインクと ZnO との濡れ性の改善が課題の一つである。解決策としては、量子ドットインクの溶媒探索と、電荷分離を阻害しない、ZnONW 表面を改質(単分子修飾など)することなどが考えられる。

◆ 発表論文: A. Takahshi et al., *Energies* 2020, 13, 5037.

(a)



(c)

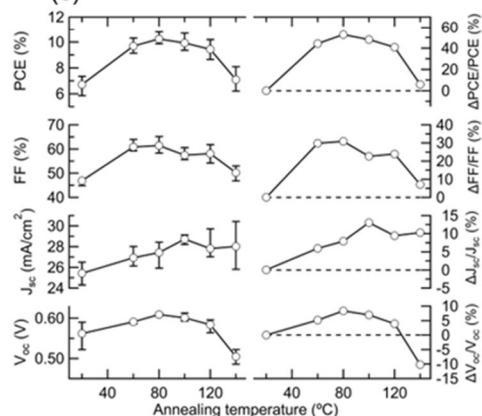


図 5. セル構造 (a) とセル特性 (b) のアニール条件依存

ZnO ナノワイヤの高品質化によるキャリア輸送特性の改善

ZnONW を、異なる 3 種類の雰囲気 (O_2 、 N_2 、 $H_2/N_2(1:9)$) と異なる温度によりアニール処理した。この時、すべての条件で ZnONW の可視光領域での発光の強度が減少し、ギャップ内の欠陥が減少していることが示唆された(非輻射再結合については、何れの ZnONW においても同程度と仮定)。しかしながら、PL スペクトルはアニール条件により異なるプロフィールを示すことから、発光に關与する欠陥準位の種類や量比が異なることが推察された(図 6(a))。

本検討では、赤外吸収コロイドナノ結晶として、 $AgBiS_2$ を用いて、ZnO の欠陥準位が太陽電池特性へ与える影響を評価した。酸素空孔(V_o^{2+} , V_o^+)と格子間 Zn に着目した場合、格子間 Zn が多い ZnO を用いたセルと酸素空孔が多い ZnO を用いたセルの性能を比較した場合、酸素空孔の影響が大きいことが分かった。この違いは、格子間 Zn は、伝導帯下端から浅い捕捉準位を形成するため、格子間 Zn が形成されたとしてもキャリア輸送への影響が小さいと考えられる。一方、酸素空孔はバンドギャップ内の深い準位を形成する。そのため、キャリア輸送の高効率化のためには、酸素空孔を低減させることが、有効であると考えられる(図 6(b))。

本検討では、 O_2 雰囲気下 500 でアニール処理をして、酸素空孔を低減させた ZnO NW で作製した太陽電池で、既報の積層型セル(ITO/ZnO 緻密層/ $AgBiS_2$ 層/P3HT/Au) よりも、良好な太陽電池特性を得た (5.4% ; $J_{sc} = 22.21 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 0.41 \text{ V}$, $FF = 60\%$)。

◆ 発表論文 : X. Yun et al., *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, **14**, 5, 6994–7003.

赤外コロイド量子ドットヘテロ接合太陽電池の構築と高性能化

最適なヘテロ接合界面におけるキャリア輸送効率の高性能化の検証として、 $2 \mu\text{m}$ 帯から光電変換を行うヘテロ接合太陽電池(赤外コロイド量子ドットヘテロ太陽電池)の第一励起子吸収位置($1.8 \mu\text{m}$)の内部量子収率(EQE)を可視領域と同等にすることを目的とした。赤外 EQE の改善には、コロイド量子ドットの欠陥やサイズ分布の低減、ZnONW の形態制御や欠陥低減を行うことが、良好な PbSQD/ZnONW 混合層の形成のポイントとなる。ZnONW を酸素雰囲気のアニール条件を検討し、欠陥低減効果を欠陥由来の可視発光強度で評価した。ZnONW のサイズと密度は、ZnO 種層の結晶粒を 20nm 程度から 100nm 程度とすることで、NW 間の空隙を増加させることができた、量子ドットの充填状態を改善させた。さらに、赤外高透過性透明導電性薄膜を併用することで、研究開発当初と比較して赤外領域の EQE を改善させた。励起子ピーク ($1.65 \mu\text{m}$) に対応する EQE は、18%から 36%に増加させることができた(図 7)。更に、コロイド量子ドットの合成時に、反応物を混合する量や混合速度を精密に自動制御することで、量子ドット径分布を小さくすることが可能となった。励起子吸収ピークが $1.55 \mu\text{m}$ の量子ドットではあるが、EQE が 50%となり、ピーク幅も先鋭化することが確認できた。 $1.8 \mu\text{m}$ 帯の量子ドットには、未適応ではあるが、同様な EQE 改善効果が得られるものと考えられる。

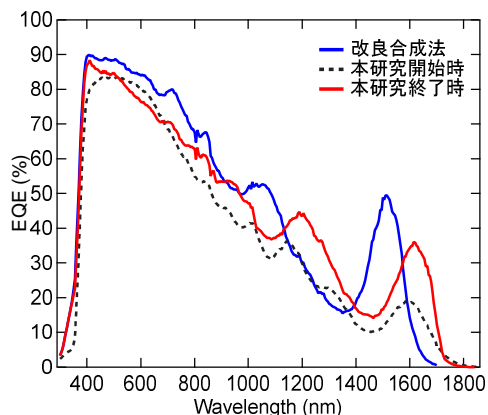


図 7. 赤外吸収 PbSQD で作製したナノワイヤ型セルの EQE スペクトル

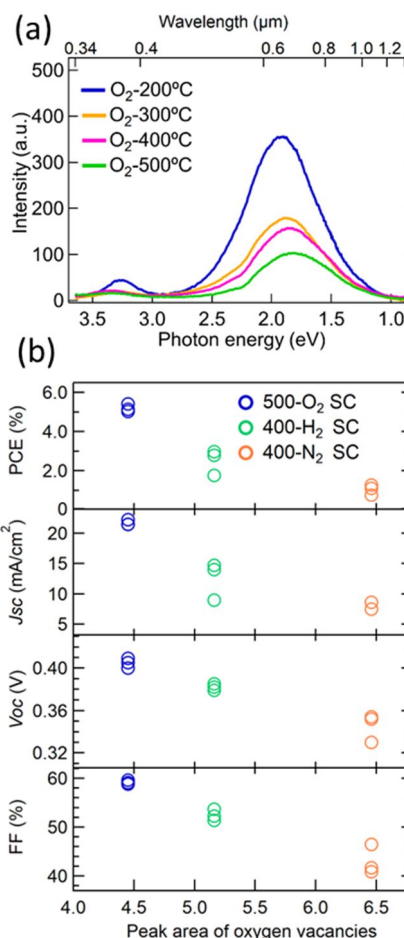


図 6 ZnONW の可視 PL(a)と光電変換性能の酸素欠陥依存(b)

その他発表論文 : Y. Jia et al., *ACS Energy Lett.* 2021, **6**, 493–500.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jia Yuwen, Wang Haibin, Wang Yinglin, Shibayama Naoyuki, Kubo Takaya, Liu Yichun, Zhang Xintong, Segawa Hiroshi	4. 巻 6
2. 論文標題 High-Performance Electron-Transport-Layer-Free Quantum Junction Solar Cells with Improved Efficiency Exceeding 10%	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Energy Letters	6. 最初と最後の頁 493 ~ 500
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsenenergylett.0c02497	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 Xiao Yun, Wang Haibin, Awai Fumiyasu, Shibayama Naoyuki, Kubo Takaya, Segawa Hiroshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Eco-Friendly AgBiS ₂ Nanocrystal/ZnO Nanowire Heterojunction Solar Cells with Enhanced Carrier Collection Efficiency	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 3969 ~ 3978
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssami.0c19435	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 Takahashi Akihiro, Wang Haibin, Fukuda Takeshi, Kamata Norihiko, Kubo Takaya, Segawa Hiroshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Annealing-Temperature Dependent Carrier-Transportation in ZnO/PbS Quantum Dot Solar Cells Fabricated Using Liquid-Phase Ligand Exchange Methods	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 5037 ~ 5037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en13195037	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 Xiao, Yun; Wang, Haibin; Awai, Fumiyasu; Shibayama, Naoyuki; Kubo, Takaya; Segawa, Hiroshi	4. 巻 14
2. 論文標題 Emission Spectroscopy Investigation of the Enhancement of Carrier Collection Efficiency in AgBiS ₂ -Nanocrystal/ZnO-Nanowire Heterojunction Solar Cells	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 6994 ~ 7003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssami.1c21762	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 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Takaya Kubo
2. 発表標題 Colloidal Quantum Dots and Next Generation Photovoltaics
3. 学会等名 International Conference on Condensed Matter Photo-Physics Summer (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Xiao, H. Wang, N. Shibayama, T. Kubo, and H. Segawa
2. 発表標題 Eco-Friendly AgBiS ₂ Nanocrystal / ZnO Nanowire Heterojunction Solar Cells with Enhanced Carrier Collection Recording available
3. 学会等名 Prime2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa
2. 発表標題 Short-wave Infrared PbS Colloidal Quantum Dot ZnO Nanowire Solar Cells for tandem solar cells
3. 学会等名 Prime2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa
2. 発表標題 Eco-friendly AgBiS ₂ Nanocrystal / ZnO Nanowire Heterojunction Solar Cells with Enhanced Carrier Collection
3. 学会等名 第81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 王海濱、久保貴哉、瀬川浩司
2. 発表標題 PbS量子ドット/ZnOナノワイヤ太陽電池：オーバーコート層の効果
3. 学会等名 第81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 H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa
2. 発表標題 Colloidal Quantum Dots and Next Generation Photovoltaics
3. 学会等名 International Conference on Condensed Matter Photo-Physics Summer (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haibin Wang,1 Yun Xiao,1 Jotaro Nakazaki,1 Takaya Kubo,1 Hiroshi Segawa1,2
2. 発表標題 Effect of ZnO Annealing Condition on the Performance of PbS Quantum Dot/ZnO Nanowires Solar Cells
3. 学会等名 日本化学会第101回春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yun Xiao,1 Haibin Wang,1 Naoyuki Shibayama,1 Takaya Kubo,1 Hiroshi Segawa
2. 発表標題 Control of ZnO nanowire quality by annealing atmosphere and its influence on AgBiS ₂ nanocrystal-based solar cells
3. 学会等名 日本化学会第101回春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kubo, H. Wang, S. Nakao, H. Saito, N. Miyashita, Y. Okada, T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa
2. 発表標題 PbS QD/ZnO nanowire solar cells for series-connected triple-junction solar cells with a power conversion efficiency of approximately 30%
3. 学会等名 2019MRS Spring Meeting & Exhibit (Phoenix, USA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa
2. 発表標題 High efficiency infrared PbS QD solar cells toward the bottom subcell of tandem solar cells
3. 学会等名 The 6th Conference on Science and Technology of Emerging Solar Energy Materials (Beijing, China) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 王海濱、久保貴哉、瀬川浩司
2. 発表標題 PbS量子ドット/ZnOヘテロ接合太陽電池：平坦型とナノワイヤ型の比較
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会（北海道大学、日本）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Wang, S. Nakao, T. Hasegawa, T. Kubo, and H. Segawa
2. 発表標題 Enhanced Short-circuit Current in PbS Quantum Dot Solar Cells with Highly Infrared Transparent Window Layers
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (TOEO-11, Nara, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Xiao, H. Wang, T. Kubo, and H. Segawa
2 . 発表標題 Solution-processed AgBiS ₂ Nanocrystal/ZnO Heterjunction Solar Cells
3 . 学会等名 The 9th CSJ Chemistry Festa
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa
2 . 発表標題 PbS quantum dot / ZnO nanowire solar cells with high infrared spectral sensitivity
3 . 学会等名 The 29th International conference on Photovoltaic Science & Engineering (PVSEC-29, Xi'an China)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Wang, T. Kubo, C. Gagliard, Y. Okada, and H. Segawa
2 . 発表標題 Enhanced Open-circuit Voltage of PbS Quantum Dot Solar Cells with Organic Surface Passivated ZnO Nanowires
3 . 学会等名 MRM (Yokohama, Japan) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Kubo, H. Wang, and H. Segawa
2 . 発表標題 Solution-processed Colloidal Quantum Dot-based Infrared Photovoltaics toward Ultra-high Efficiency
3 . 学会等名 MRM (Yokohama, Japan) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa
2. 発表標題 Enhanced Infrared Photocurrent of PbS Quantum Dot Solar Cells toward the Bottom Subcell of Multi-junction Solar Cells
3. 学会等名 Perovskite and Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP20, Tsukuba, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Wang, C. Gagliard, J. Nakazaki, T. Kubo, and H. Segawa
2. 発表標題 Enhancement of PbS Quantum Dot Solar Cell Performance with Surface Passivated ZnO Nanowires
3. 学会等名 日本化学会第100春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Xiao, H. Wang, N. Shibayama, T. Kubo, and H. Segawa
2. 発表標題 Solution-processed AgBiS ₂ Nanocrystal/ZnO Nanowire Heterjunction Solar Cells,
3. 学会等名 日本化学会第100春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋晃宏、王海濱、福田武司、鎌田憲彦、久保貴哉、瀬川浩司
2. 発表標題 PbS量子ドット/ZnO太陽電池特性に対する量子ドット層熱処理の影響
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

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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