

結晶成長及び界面構造の制御による鉛フリーペロブスカイト太陽電池の高性能化研究

High-Performance Lead-Free Perovskite Solar Cells by Controlling Crystal Growth and Interface Structures

研究代表者 京都大学化学研究所 助教 中村 智也

Tomoya Nakamura

Tin halide perovskites, ASnX_3 ($\text{A} = \text{CH}_3\text{NH}_3^+$ (MA^+), $(\text{NH}_2)_2\text{CH}^+$ (FA^+), Cs^+ ; $\text{X} = \text{I}^-, \text{Br}^-, \text{Cl}^-$), are promising light absorbers in environmentally-friendly, solution-processed solar cells. In this work, high-performance tin-containing perovskite solar cells were realized using high-quality perovskite films which eliminates the contamination of Sn^{4+} impurities. (1) A series of bromide-containing tin perovskite films was systematically evaluated by varying the A-site (FA^+ , MA^+) and X-site (I^- , Br^-) ions. The best power conversion efficiency of 7.74% was obtained with the composition of $\text{FA}_{0.75}\text{MA}_{0.25}\text{SnI}_{2.25}\text{Br}_{0.75}$. (2) A surface modification method of tin-lead mixed perovskite films was developed. The dipole formation by applying ethylene diammonium and glycine to the top and bottom surface of perovskite films, respectively, improves the carrier extraction at the interfaces, leading to the enhanced the power conversion efficiency up to 23.6%. This method was found to be also applicable to pure-tin perovskite solar cells, giving the maximum efficiency of 11.4%.

要旨

ASnX_3 型 (A : 1 価陽イオン、 X : ハロゲン化物イオン) のスズハライドペロブスカイト半導体は、環境負荷の少ない塗布型太陽電池の光吸収材料として期待されている。本研究では、材料中に 4 価のスズイオン (Sn^{4+}) 不純物を含まない高純度スズペロブスカイト薄膜作製技術をもとに、本太陽電池の高性能化に向けた研究を行った。(1) X サイトに I と Br を混合した $\text{ASnI}_{3-y}\text{Br}_y$ 型広バンドギャップスズペロブスカイト材料の組成探索、また (2) スズ-鉛混合型およびスズペロブスカイトの上下界面の構造修飾法の開発に取り組んだ。

1. まえがき

近年、ペロブスカイト半導体材料を用いた太陽電池が、材料の溶液を塗って作製できる次世代型太陽電池として注目を集めている。この材料は、 ABX_3 型 (A : 1 価陽イオン、 B : 2 価陽イオン、 X : ハロゲン化物イオン) 構造で表される (図 1)。これまで、 B サイトのイオンとして鉛 (Pb) を含む鉛系ペロブスカイト半導体材料が主に研究されてきたが、鉛が及ぼす環境や人体への影響が懸念されている。そのため、実用化の観点からは、環境負荷の小さい鉛フリー材料を用いた太陽電池の開発が強く求められて

いる。スズ (Sn) ペロブスカイトは鉛フリーの有望候補材料として期待されているが、2 価のスズイオン (Sn^{2+}) が非常に酸化されやすく、半導体特性を低下させる 4 価のスズイオン (Sn^{4+}) を生じることが問題となっていた。我々は、材料中に含まれる微量の Sn^{4+} 不純物を捕捉除去する「スカベンジャー法」の開発により、 Sn^{4+} 種の混在を 0.0% まで低減した高品質の薄膜の作製に成功し、これにより、再現性良く 10% を超える光電変換効率が得られるようになってきた⁽¹⁾。本研究では、高純度 Sn ペロブスカイト薄膜作製技術をもとに、含 Sn ペロブスカイト太陽電池のさらなる高性能化に取り組んだ。

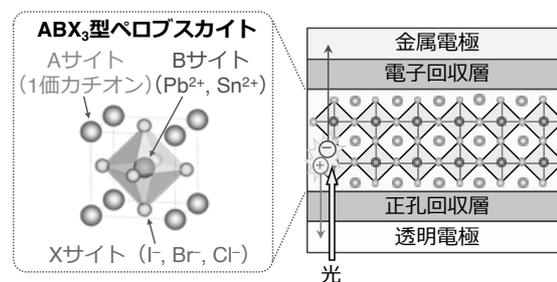


図 1. ABX_3 型ペロブスカイト半導体の構造およびペロブスカイト太陽電池の素子構造.

2. 広バンドギャップスズペロブスカイト材料の組成探索^[1]

ABX₃型ペロブスカイト半導体は、A, B, Xの各サイトに用いるイオンの組み合わせにより、光吸収・発電波長を自在に制御できることを特徴とする。特に、XサイトのハライドとしてIに加えBrを含む組成では、広いバンドギャップをもち、屋内のLEDなどの照明の波長に適した可視光の領域を効率的に光電変換する太陽電池を作製することが可能である。

本研究では、Brを含むSnペロブスカイト材料について、AサイトおよびXサイトのイオンの割合を系統的に変化させて有望組成の探索を行った。独自に開発した高純度前駆体材料SnBr₂(dmf)^[2]とSn⁴⁺種のスカベンジャー法^[1]を組み合わせる(図2a)ことで、不純物の影響を排除した高品質薄膜を作製することができた。XサイトにIとBr、AサイトにFA (FA = NH₂CHNH₂⁺)とMA (MA = CH₃NH₃⁺)を混合した一連の広バンドギャップ材料FA_{1-x}MA_xSnI_{3-y}Br_y (x = 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, y = 0.00, 0.75, 1.50, 2.25, 3.00)の薄膜を作製し、系統的な物性評価を行った(図2b)。

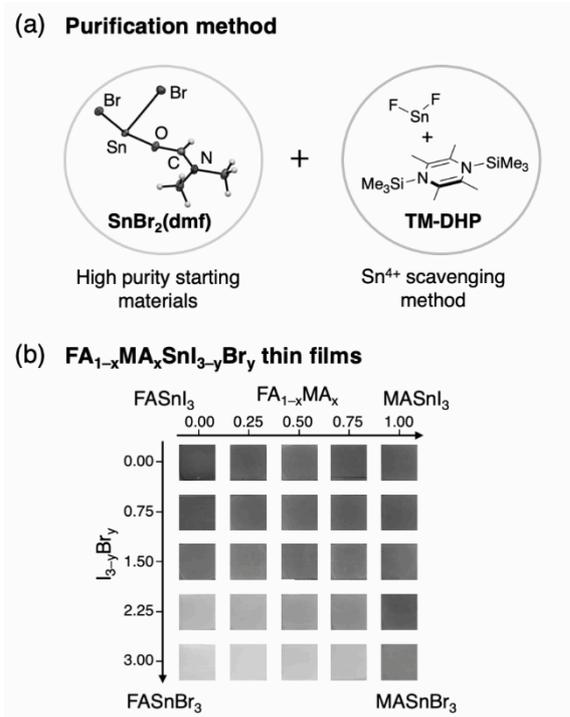


図2. 臭素を含むSnペロブスカイト薄膜の系統的物性評価。(a)高純度化法および(b)一連のイオン混合型Snペロブスカイト薄膜。

一連のイオン混合型Snペロブスカイト薄膜について、蛍光スペクトルのピークトップからバンドギャップを見積もり、時間分解蛍光測定から求めた蛍光寿命により、光励起によって生じたキャリアの安定性を評価した。また、光電子収量分光(PYS)スペクトルの立ち上がりから価電子帯準位を評価した。

まず、バンドギャップは、ASnI₃ (y = 0.00)の系について、AサイトをFA (イオン半径 253 pm)からMA (イオン半径 217 pm)に置き換えていくと、1.40 eVから1.28 eVに徐々に減少した(図3a)。イオン半径の小さなMAをAサイトに用いることでSn-I結合が短くなり、バンドギャップが減少したのと考えられる。また、Brの割合を増やすに従ってバンドギャップは1.28 eV (MASnI₃)から2.13 eV (MASnBr₃)まで徐々に大きくなった。次に、蛍光寿命についてみてみると、ASnI₃の系ではFASnI₃ (τ = 9.5 ns)からMASnI₃ (τ = 2.1 ns)まで、MAの割合が増えるにつれて蛍光寿命が短くなった(図3b)。一方、Brを0.75含むASnI_{2.25}Br_{0.75}の系では、MAの割合が増えるに従って傾向寿命が1.2 ns (x = 0.00)から5.4 ns (x = 0.25)、7.0 ns (x = 0.50)と長くなり、3.8 ns (x = 0.75)、3.0 ns (x = 1.00)と短くなった。さらに臭素の割合を増やしたI_{1.50}Br_{1.50}の系では、MAだけの場合(x = 1.00)が最も寿命が長くなった(τ = 2.3 ns)。以上の結果から、イオン半径の小さいBrの割合が増えるに従って、イオン半径の小さなMAの割合を増やすのが、構造の安定性の観点から望ましいものと考えられる。

また、価電子帯準位については、ASnI₃の系ではFASnI₃ (-5.00 eV)からMAの割合が増えるに従って、一旦深く(x = 0.25, x = 0.50; VB = -5.22 eV)なってまた浅くなる(x = 1.00; VB = -4.83 eV)という傾向が見られた(図3c)。Brを0.75含むASnI_{2.25}Br_{0.75}の系において、価電子帯準位は-5.25 eV (x = 0.00)、-5.35 eV (x = 0.25)、-5.18 eV (x = 0.50)となり、一般的な正孔回収材料のHOMO準位(PEDOT:PSS: -5.06 eV, Spiro-OMeTAD: -5.17 eV)とのマッチングの良い、深めの価電子帯準位をもつことが明らかになった。

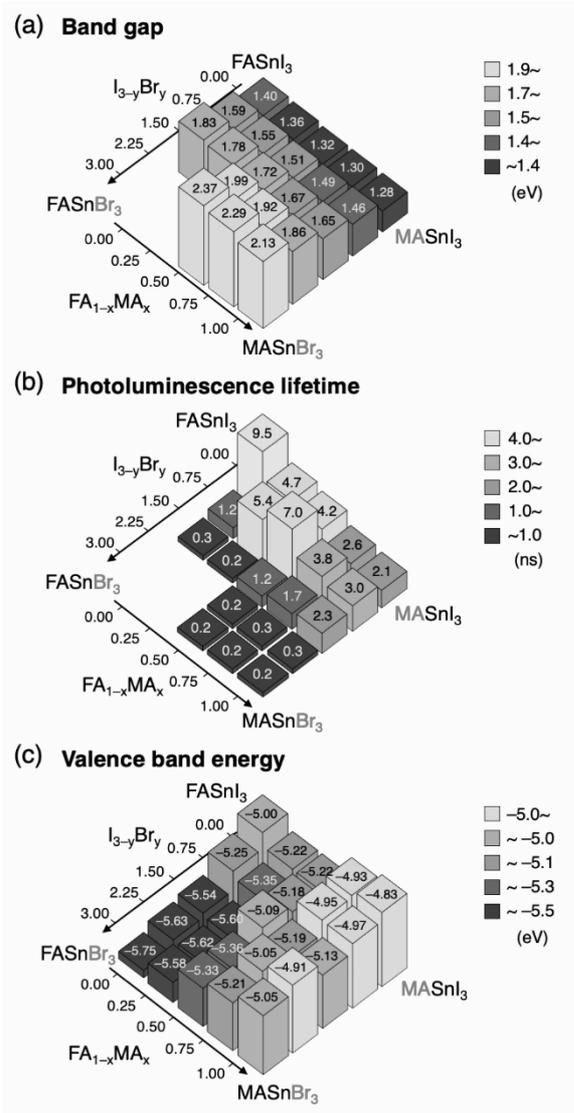


図3. FA/MA混合系におけるAサイトおよびXサイトの組成の効果. (a)バンドギャップ, (b)蛍光寿命, および (c) 価電子帯 (VB) 準位.

以上のマッピング結果により、Br を 0.75 含む $FA_{1-x}MA_xSnI_{2.25}Br_{0.75}$ の系は、比較的長い傾向寿命と深い価電子帯準位をもつことから有望な組成と考えられた。そこで、FA と MA の比率を変えた $x = 0.00, 0.25, 0.50$ の 3 つの組成のスズペロブスカイト材料を光吸収層に用いて、実際に逆型構造 (透明電極側から正孔回収層 / ペロブスカイト層 / 電子回収層) のペロブスカイト太陽電池を作製した (図 4a)。蛍光寿命が 1.2 ns と短い $x = 0.00$ の組成を用いた素子では、短絡電流密度 J_{sc} が 0.88 mA/cm^2 と極めて低い値となった (図 4b)。一方、 $x = 0.25$ ($\tau = 5.4 \text{ ns}$) および $x = 0.50$ ($\tau = 7.0 \text{ ns}$) の素子ではそれぞれ 16.8 mA/cm^2 および 16.9 mA/cm^2 の電流密度が得られ、それぞれ 7.74%、

7.27% の光電変換効率を示した。また、価電子帯準位の深い $x = 0.25$ ($V_B = -5.35 \text{ eV}$) の素子では、 $x = 0.50$ ($V_B = -5.18 \text{ eV}$) の素子よりも高い 0.61 V の開放電圧が得られた。以上より、太陽電池素子の特性と、蛍光寿命や価電子帯準位などの基礎物性との相関を示唆する結果が得られた^[1]。

しかし、得られた開放電圧 (0.61 V) は、本材料のバンドギャップ (1.55 eV) と比べると 0.94 V もの大きな電圧ロスがあることがわかる。さらに太陽電池の特性を向上させるためには、ペロブスカイト層から電荷を取り出す際の電圧のロスを低減できる、表面構造の精密制御手法の開発が必要であると考えられた。

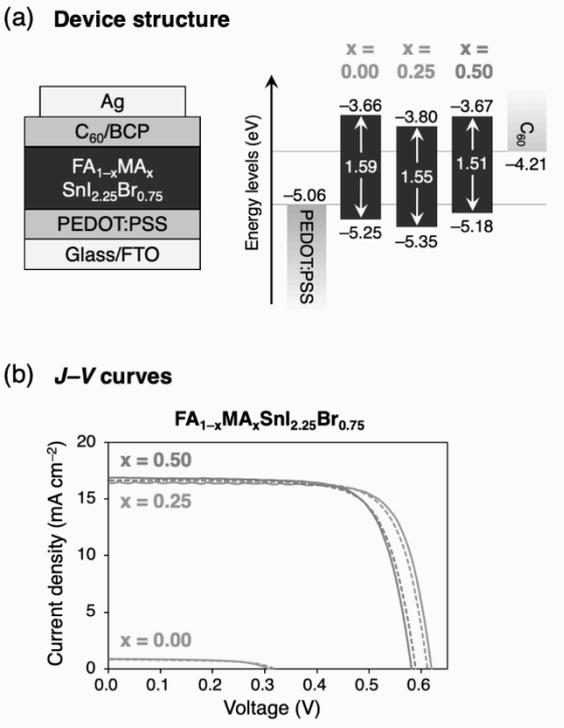


図4. Sn ペロブスカイト太陽電池の作製. (a)素子構造とエネルギー準位, および (b) 電流-電圧曲線.

3. 界面構造修飾法の開発^{[2], [3]}

B サイトのイオンとして Sn と Pb を 1:1 で混合したスズ-鉛混合型ペロブスカイト半導体は、太陽光を近赤外領域 (~1050 nm) まで広く吸収できるという利点がある。我々は、本材料に対して、電圧のロスを抑えて電荷を効率的に回収するための、独自の表面構造修飾 (パッシベーション) 法の開発に取り組

んだ。具体的には、各電荷の取り出しに有利な電気双極子モーメントをもつように工夫した2つの分子材料（グリシンとエチレンジアンモニウム）を設計し、ペロブスカイト層の上下の表面をこれらの分子で構造修飾する手法を開発した（図5a, b）。ペロブスカイト層の上面への構造修飾は、エチレンジアンモニウムジヨード（EDAI₂）の溶液の溶媒や塗り方を工夫することで達成することができた。一方で、ペロブスカイト層の下面への構造修飾については、ペロブスカイト薄膜を塗布で成膜する際に、材料の溶液に2 mol%のグリシン塩酸塩（GlyHCl）を加えることで実現できることを見出した。これらの構造修飾を施したペロブスカイト薄膜に対して、イオンの分布を二次イオン質量分析法（ToF-SIMS）を用いて観測したところ、860 nmの膜厚のスズ-鉛混合型ペロブスカイト薄膜の上層にはエチレンジアンモニウム、下層にはグリシンが選択的に存在することが確認された。

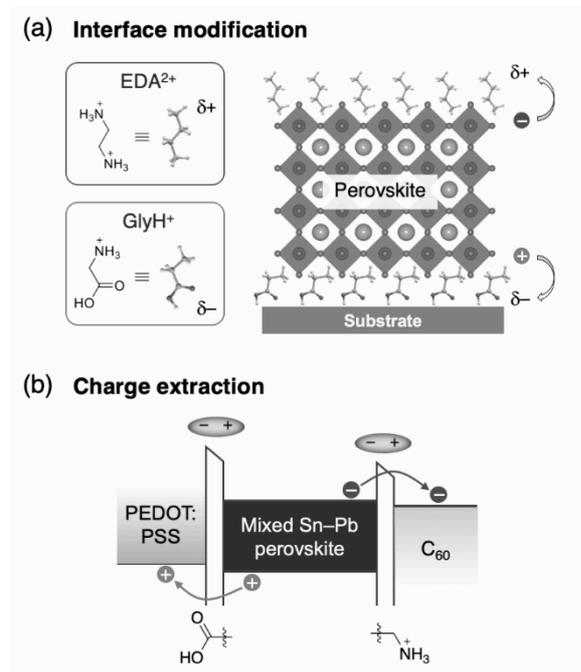


図5. ペロブスカイト薄膜の上下表面の構造修飾（パッシベーション）法。(a)模式図および(b)エネルギー準位図。

これらのペロブスカイト層の上下の表面パッシベーションにより、太陽電池の特性も大きく向上した（図6a, b）。光電変換効率は、従来の手法で作製した太陽電池（19.6%）に比べて、上面をエチレンジアン

モニウムで構造修飾することで21.7%へと向上し、さらに下面をグリシンで構造修飾することで23.6%（短絡電流密度32.1 mA/cm²、開放電圧0.89 V、曲線因子0.82）にまで向上することを見出した。この光電変換効率は、スズを含むペロブスカイト半導体材料を用いた太陽電池としても世界最高値となる。また、開放電圧は最大で0.91 Vにまで向上した。これは、スズ-鉛混合型ペロブスカイト半導体をもつ1.25 eVのバンドギャップに対してわずか0.34 Vのロスであり、ほぼ熱力学的な理論限界値を達成していることになる。今回のペロブスカイト層の上下の表面構造修飾により、なぜ開放電圧のロスが低減でき高い光電変換効率が得られるのかについても、蛍光分光、紫外光電子分光（UPS）および電子スピン共鳴（ESR）などの様々な先端分光法を用いた測定により、そのメカニズムと効果を明らかにした。エチレンジアンモニウムとグリシンで表面を構造修飾することで、表面にそれぞれ電子と正孔の取り出しに有利な正電荷と負電荷をもつ電気双極子を発現させることができる。ペロブスカイト薄膜から各電荷がこれらの電気双極子に引き寄せられることで、電圧のロスなく各電荷を上下の電荷回収層へと効率的に取り出すことができることがわかった（図5b）^[2]。

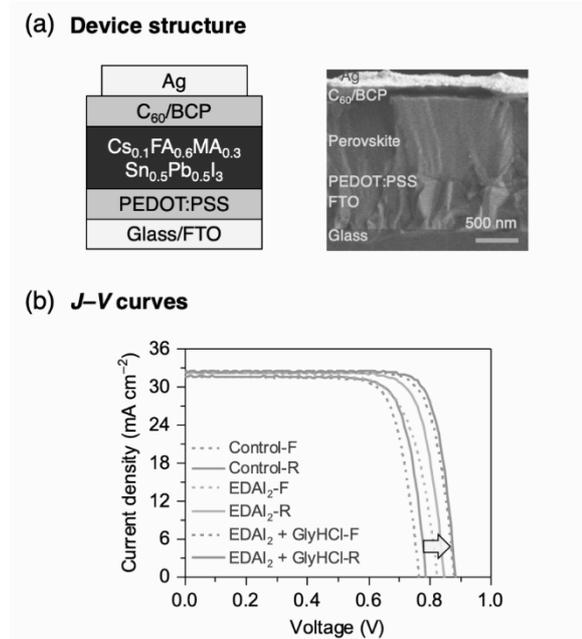


図6. スズ-鉛混合型ペロブスカイト太陽電池。(a)デバイス構造の模式図と断面電子顕微鏡像、および(b)電流-電圧曲線。

さらに、Sn-Pb 混合型ペロブスカイト太陽電池で得られた知見をもとに、Sn ペロブスカイト薄膜の表面構造修飾に取り組んだ (図 7a, b)。Sn ペロブスカイトは、Pb や Sn-Pb ペロブスカイトと比べて溶媒に溶けやすく、非配位性極性溶媒であるイソプロパノールにも溶解してしまう。Sn ペロブスカイト薄膜の表面にスピコートによる構造修飾を行う場合 (wet 法) は、イソプロパノールに低極性のトルエンを 1:1 で混合した溶媒にエチレンジアンモニウムジヨード (EDA₂) を飽和させた溶液を用い、接触時間を短くして薄膜の溶解を防ぐ工夫が重要であることがわかった。また、EDA₂ を薄く真空蒸着により成膜する方法 (dry 法) によっても表面構造修飾が可能であることを見出した。

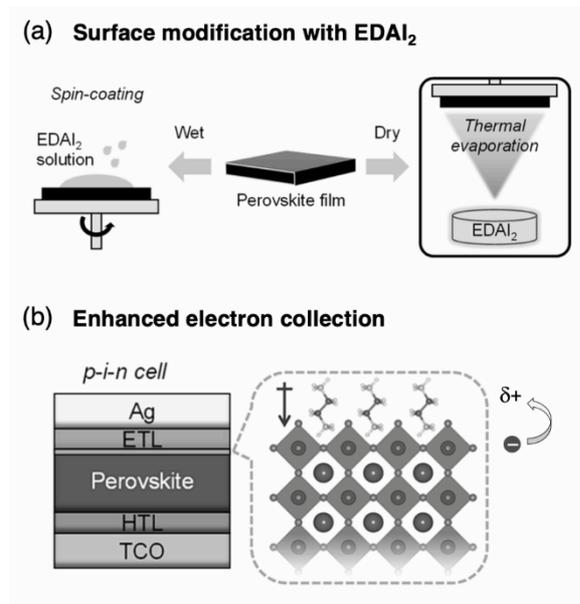


図 7. EDA₂ を用いた表面構造修飾法。 (a) wet 法および dry 法による EDA₂ 層の成膜、および (b) 表面における電気双極子の形成。

本方法は、ペロブスカイトの種類 (Pb 系、Sn-Pb 系、Sn 系) およびその組成を問わず、逆型構造の素子 (透明電極側から正孔回収層 / ペロブスカイト層 / 電子回収層) では一般的に適用でき、開放電圧の上昇により太陽電池特性を向上できることがわかった。2 種類の組成の Sn ペロブスカイト太陽電池において、FASnI₃ では開放電圧が 0.53 V から 0.61 V (wet 法) および 0.59 V (dry 法) に上昇し、光電変換効率は 6.7% から 9.7% (wet 法) および 9.5% (dry 法) に向上した (図 8a, b)。FA_{0.75}MA_{0.25}SnI₃ では、開放電圧

が 0.49 V から 0.69 V (wet) および 0.66 V (dry) に、光電変換効率は 7.3% から 11.4% (wet) および 10.1% (dry) に向上することがわかった^[3]。

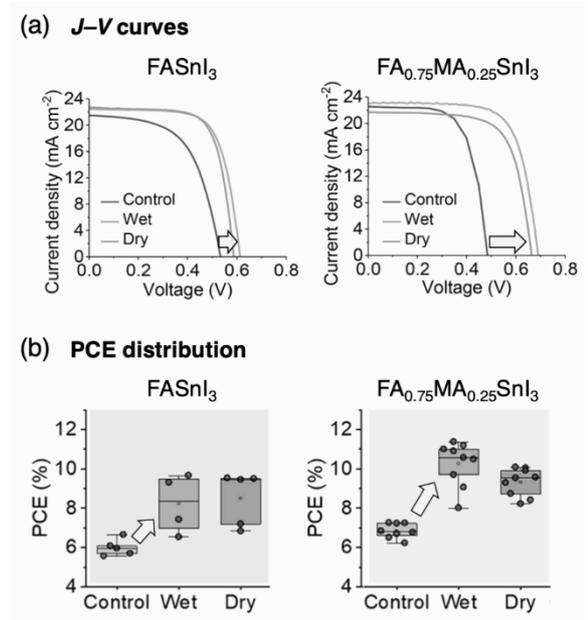


図 8. Sn ペロブスカイト太陽電池の光電変換特性の向上。 (a) 電流-電圧曲線、および (b) 光電変換効率の分布。

4. まとめ

高純度スズペロブスカイト薄膜作製技術をもとに、スズを含む太陽電池の高性能化に向けた研究にとりくんだ。(1) X サイトに Br を含む Sn ペロブスカイト材料において、A サイト (FA/MA) および X サイト (I/Br) の割合を変化させた一連の薄膜について系統的な物性評価を行った。FA_{0.75}MA_{0.25}SnI_{2.25}Br_{0.75} の組成では比較的長い蛍光寿命 (5.4 ns) と深い価電子帯準位 (-5.35 eV) が得られ、本材料を用いた太陽電池は 7.74% の光電変換効率を示した^[1]。また、(2) スズ-鉛混合型ペロブスカイト材料について、エチレンジアンモニウムとグリシンで薄膜上下の表面を構造修飾する手法を開発し、理論限界に迫る開放電圧と最高で 23.6% の光電変換効率を実現した^[2]。本手法はスズペロブスカイト太陽電池にも適用可能であり、最高で 11.4% の光電変換効率を得ることができた^[3]。

発表論文

- [1] T. Nakamura, K. Otsuka, S. Hu, R. Hashimoto, T. Morishita, T. Handa, T. Yamada, M. A. Truong, R. Murdey, Y. Kanemitsu, A. Wakamiya, “Composition-Property Mapping in Bromide-Containing Tin Perovskite Using High Purity Starting Materials”, *ACS Appl. Energy Mater.* **2022**, *5*, 14789.
- [2] S. Hu, K. Otsuka, R. Murdey, T. Nakamura, M. A. Truong, T. Yamada, T. Handa, K. Matsuda, K. Nakano, A. Sato, K. Marumoto, K. Tajima, Y. Kanemitsu, A. Wakamiya, “Carrier Extraction at Interfaces for 23.6% Efficient Tin-Lead Perovskite Solar Cells”, *Energy Environ. Sci.* **2022**, *15*, 2096.
- [3] S. Hu, J. Pascual, W. Liu, T. Funasaki, M. A. Truong, S. Hira, R. Hashimoto, T. Morishita, K. Nakano, K. Tajima, R. Murdey, T. Nakamura, A. Wakamiya, “A Universal Surface Treatment for p-i-n Perovskite Solar Cells”, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2022**, *14*, 56290.
- [4] R. Murdey, Y. Ishikura, Y. Matsushige, S. Hu, J. Pascual, M. A. Truong, T. Nakamura, A. Wakamiya, “Operational Stability, Low Light Performance, and Long-Lived Transients in Mixed-Halide Perovskite Solar Cells with a Monolayer-Based Hole Extraction Layer”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2022**, *245*, 111885.
- [5] M. A. Truong, T. Funasaki, L. Ueberricke, W. Nojo, R. Murdey, T. Yamada, S. Hu, A. Akatsuka, N. Sekiguchi, S. Hira, L. Xie, T. Nakamura, N. Shioya, D. Kan, Y. Tsuji, S. Iikubo, H. Yoshida, Y. Shimakawa, T. Hasegawa, Y. Kanemitsu, T. Suzuki, A. Wakamiya, “A Tripodal Triazatruxene Derivative as a Face-On Oriented Hole-Collecting Monolayer for Efficient and Stable Inverted Perovskite Solar Cells”, *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, in press. DOI: 10.1021/jacs.3c00805.

口頭発表

- [1] Tomoya Nakamura, Kento Otsuka, Shuaifeng Hu, Tarou Morishita, Ruito Hashimoto, Taketo Handa, Yoshihiko Kanemitsu, Richard Murdey, Minh Anh Truong, Atsushi Wakamiya, “Composition-Property Mapping in Bromide-Containing Tin Perovskite”, The 8th K-J Joint Seminar on PV, Online, 2022年5月27日.
- [2] Richard Murdey, Yasuhisa Ishikura, Yuko Matsushige, Tomoya Nakamura, Minh Anh Truong, Atsushi Wakamiya, “Low light performance evaluation of mixed-halide perovskite solar cells with monolayer hole extraction layers”, The 8th K-J Joint Seminar on PV,

Online, 2022年5月27日.

- [3] 舟崎 司, ユーバリック ルーカスバイト, フ シュアイフェン, 中村 智也, マーディ リチャード, チョン ミンアン, 若宮 淳志, 「シクロオクタテトラインドール骨格を用いたテトラポッド型正孔回収単分子膜材料の開発」, 第 19 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム, 金沢, 2022年6月28日.
- [4] Atsushi Wakamiya, Shuaifeng Hu, Tomoya Nakamura, Taketo Handa, Takumi Yamada, Minh Anh Truong, Richard Murdey, Yoshihiko Kanemitsu, “Materials to Improve the Performance of Sn-Based Perovskite Solar Cells”, The 29th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD22), Kyoto, 2022年7月5日.
- [5] Tomoya Nakamura, Kento Otsuka, Shuaifeng Hu, Ruito Hashimoto, Tarou Morishita, Taketo Handa, Takumi Yamada, Minh Anh Truong, Richard Murdey, Yoshihiko Kanemitsu, Atsushi Wakamiya “Systematic Investigations on Properties of Bromide-Containing Tin Perovskites”, Global Photovoltaic Conference 2022 (GPVC 2022), Online, 2022年7月6日.
- [6] 舟崎 司, Lucas Ueberricke, Shuaifeng Hu, 中村 智也, Richard Murdey, Minh Anh Truong, 若宮 淳志, 「高性能ペロブスカイト太陽電池のための新たなトリポッド型正孔回収性単分子膜材料の開発」, 第 32 回基礎有機化学討論会, 京都, 2022年9月20日.
- [7] Wentao Liu, Shuaifeng Hu, Jorge Pascual, Taro Morishita, Takumi Yamada, Richard Murdey, Minh Anh Truong, Tomoya Nakamura, Yoshihiko Kanemitsu, Atsushi Wakamiya, “Morphology Control of Indene-C60 bisadduct Film for Efficient Tin Perovskite Solar Cells”, 第 32 回基礎有機化学討論会, 京都, 2022年9月20日.
- [8] 森下 太郎, 金子 竜二, タン テンセイ, チョン ミンアン, マーディ リチャード, 中村 智也, 若宮 淳志, 「添加剤を用いたペロブスカイト半導体の結晶成長制御」, 第 32 回基礎有機化学討論会, 京都, 2022年9月20日.
- [9] Tomoya Nakamura, Kento Otsuka, Shuaifeng Hu, Ruito Hashimoto, Tarou Morishita, Taketo Handa, Takumi Yamada, Minh Anh Truong, Richard Murdey, Yoshihiko Kanemitsu, Atsushi Wakamiya, “Composition-Property Mapping in Bromide-Containing Tin Perovskite Using High Purity Starting Materials”, 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33), Nagoya, 2022年11月15日.
- [10] Noboru Ohashi, Ryuji Kaneko, Chikako Sakai, Kenji Yazawa, Hirokazu Tahara, Taketo Handa, Tomoya Nakamura, Richard Murdey, Yoshihiko Kanemitsu, Atsushi Wakamiya, “Ultrathin flexible

- perovskite solar cells using internal stress-controlled bilayer indium tin oxide electrode”, 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33), Nagoya, 2022年11月15日.
- [11] Richard Murdey, Minh Anh Truong, Ai Shimazaki, Ryuji Kaneko, Tomoya Nakamura, Atsushi Wakamiya, “Operational stability and low light performance of wide-bandgap perovskite solar cells”, 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33), Nagoya, 2022年11月15日.
- [12] Minh Anh Truong, Tsukasa Funasaki, Lucas Ueberricke, Wataru Nojo, Richard Murdey, Takumi Yamada, Shuaifeng Hu, Tomoya Nakamura, Nobutaka Shioya, Takeshi Hasegawa, Yoshihiko Kanemitsu, Takanori Suzuki, Atsushi Wakamiya, “Efficient Inverted Perovskite Solar Cells Enabled by Multipodal Hole-Collecting Monolayers Based on Triazatruxene Skeleton”, 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33), Nagoya, 2022年11月15日.
- [13] 森下 太郎, 金子 竜二, Minh Anh Truong, Richard Murdey, 中村 智也, 若宮 淳志, 「ペロブスカイト太陽電池の大面积塗工に向けたインク組成および添加剤の探索」, 第 49 回有機典型元素化学討論会, 富山, 2022年12月8日.
- [14] Tomoya Nakamura, Kento Otsuka, Shuaifeng Hu, Ruito Hashimoto, Tarou Morishita, Taketo Handa, Takumi Yamada, Minh Anh Truong, Richard Murdey, Yoshihiko Kanemitsu, Atsushi Wakamiya, “Composition-Property Mapping in Bromide-Containing Tin Perovskite Prepared with High Purity Starting Materials”, Perovskite and Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP23), Kobe, 2023年1月24日.
- [15] Richard Murdey, Yasuhisa Ishikura, Yuko Matsushige, Shuaifeng Hu, Jorge Pascual, Minh Anh Truong, Tomoya Nakamura, Atsushi Wakamiya, “Halide segregation and the operational stability of monolayer-based p-i-n perovskite solar cells”, Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP23), Kobe, 2023年1月24日.
- [16] 中村 智也, 若宮 淳志, 「高純度材料を用いたスズ系ペロブスカイト太陽電池の開発」, 日本太陽光発電学会 ペロブスカイト太陽電池分科会 2022 年度研究会, 京都, 2023年2月9日.
- [17] 中村 智也, 若宮 淳志, 「材料化学アプローチによる高性能ペロブスカイト太陽電池の開発」, 応用物理学会 有機バイオエレクトロニクス分科会 3 月研究会, 横浜, 2023年2月17日.
- [18] 中村 智也, 「高純度材料を用いた $ASn_{1-x}Br_x$ 型スズペロブスカイト材料の系統的物性評価」, 学際統合物質科学研究機構 成果報告会, 京都, 2023年2月27日.
- [19] 中村 智也, 若宮 淳志, 「スピニコータを用いたフィルム型ペロブスカイト太陽電池の作製」, 技術情報協会, オンライン, 2023年2月28日.
- [20] 中村 智也, 原田 布由樹, 山田 琢允, 金光 義彦, Minh Anh Truong, Richard Murdey, 若宮 淳志, 「イオン混合型スズペロブスカイト単結晶の合成と物性」, 応用物理学会 2023 年春季年会, 東京, 2023年3月15日.
- [21] 原田 布由樹, 中村 智也, Minh Anh Truong, Richard Murdey, 若宮 淳志, 「溶液法を用いたスズ系ペロブスカイト半導体膜の表面処理法の開発」, 日本化学会第 103 春季年会, 千葉, 2023年3月23日.
- [22] 三宅 悠季, 中村 智也, Minh Anh Truong, Richard Murdey, 若宮 淳志, 「ロダニン骨格を用いたペロブスカイト太陽電池の単分子電子回収材料の開発」, 日本化学会第 103 春季年会, 千葉, 2023年3月23日.
- [23] 平 翔太, 舟崎 司, Richard Murdey, 中村 智也, Minh Anh Truong, 若宮 淳志, 「スクアリン骨格を用いたペロブスカイト太陽電池の正孔回収単分子膜材料の開発」, 日本化学会第 103 春季年会, 千葉, 2023年3月23日.

受賞

- [1] 有機合成化学協会 日本触媒 研究企画賞, 「鉛フリーペロブスカイト太陽電池の高性能化を実現する単分子電子回収材料の開発」, 2023年2月15日.

参考文献

- (1) S. Yakumar, M. A. Truong, K. Kim, J. Liu, S. Hu, K. Otsuka, R. Hashimoto, R. Murdey, T. Sasamori, H. D. Kim, H. Ohkita, T. Handa, Y. Kanemitsu, A. Wakamiya, *Nat. Commun.* **2020**, *11*, 3008.
- (2) T. Nakamura, M. Ozaki, Y. Katsuki, J. Liu, T. Handa, R. Nishikubo, S. Yakumar, Y. Hashikawa, Y. Murata, T. Saito, Y. Shimakawa, Y. Kanemitsu, A. Saeki, A. Wakamiya, *ACS Omega*, **2017**, *2*, 7016.