



Title	傾斜配向2次元／3次元積層構造を有するペロブスカイト太陽電池
Author(s)	鶉野, 弦也; 阿部, 健太郎; 齋藤, 智樹 他
Citation	電気材料技術雑誌. 2024, 33(1), p. 63-70
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/99610
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

傾斜配向 2 次元／3 次元積層構造を有するペロブスカイト太陽電池

鵜野 弦也¹、阿部 健太郎¹、齋藤 智樹¹、三宅 紹心¹、
菱田 大蔵²、竹岡 裕子²、藤井 彰彦^{1,3}、尾崎 雅則¹

¹大阪大学大学院工学研究科電気電子情報通信工学専攻

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

²上智大学理工学部物質生命理工学科

〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

³大阪工業大学工学部電気電子システム工学科

〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1

Perovskite solar cell with obliquely oriented 2D/3D heterostructure

Genya UZURANO¹, Kentaro ABE¹, Tomoki SAITO¹, Shogo MIYAKE¹,
Daizo HISHIDA², Yuko TAKEOKA², Akihiko FUJII^{1,3}, Masanori OZAKI¹

¹Graduate School of Engineering, Osaka University

2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565-0871, JAPAN

²Faculty of Science and Technology, Sophia University

7-1 Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8554, JAPAN

³Faculty of Engineering, Osaka Institute of Technology

5-16-1 Omiya, Asahi-ku, Osaka-shi, Osaka 535-8585, JAPAN

Perovskite solar cells are attracting attention as next-generation solar cells; however, their stability against moisture remains an issue. Although 2D/3D heterostructure are expected to improve stability of solar cells, horizontally oriented 2D perovskite inhibits charge transport, resulting in a decrease in power conversion efficiency. In this study, orientation-controlled 2D perovskite in 2D/3D heterostructure improved the power conversion efficiency of solar cells. Horizontally oriented 2D perovskite inhibited charge transport and decreased the power conversion efficiency of solar cells, while obliquely oriented 2D perovskite realized efficient charge transport and suppressed the decrease in power conversion efficiency. The enhanced stability of 2D/3D heterostructure solar cell with obliquely oriented 2D perovskite indicates that orientation controlled 2D/3D heterostructure is effective for stable and high-performance perovskite solar cell.

キーワード：ペロブスカイト太陽電池、2次元ペロブスカイト、配向制御、安定性

1. はじめに

MAPbI₃ に代表される 3 次元ペロブスカイトに
2 次元ペロブスカイトを積層した 2 次元／3 次元

積層構造は、ペロブスカイト太陽電池の課題である安定性を解決する優れた手法として注目される^{1),2)}。2 次元ペロブスカイトは、前駆体材料のアル

キルアンモニウムの疎水性により優れた安定性を示す^{3),4)}。しかし、2次元/3次元積層構造には、基板に対して水平に配向した2次元ペロブスカイトが3次元ペロブスカイトから電極への電荷輸送を阻害するという問題がある⁵⁾。したがって、2次元/3次元構造中の2次元ペロブスカイトを厚くすると安定性は向上するが、変換効率が低下するというトレードオフが存在する^{6),7)}。

本研究では、図1に示すように、配向が制御された2次元ペロブスカイトが太陽電池中の電荷輸送を阻害しないことに着目した⁸⁾⁻¹⁰⁾。2次元ペロブスカイトを製膜する際の下地層となる、3次元ペロブスカイトの結晶方位によって2次元ペロブスカイトの配向を制御する手法を導入し、傾斜配向2次元/3次元積層構造を実現した^{11),12)}。また、水平配向または傾斜配向の2次元/3次元積層構造を有する太陽電池を作製し、2次元ペロブスカイトの配向が太陽電池特性に与える影響を評価した¹³⁾。

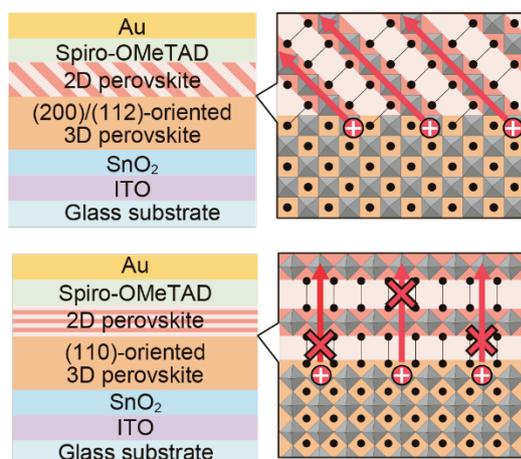


図1 2次元ペロブスカイト配向制御の概念図

Fig. 1 Schematic illustration of orientation control of 2D perovskite.

2. 実験方法

2. 1. 使用した試料

3次元ペロブスカイト前駆体として使用した濃度1.3 MのMAPbI₃溶液およびMAPbI₂Br溶液は、methylammonium iodide (MAI ; 99.0%、東京化成工業) または methylammonium bromide (MABr ; 98.0%、東京化成工業) と PbI₂ (99.99% trace metal basis、東京化成工業) を物質質量比 1:1 の割合で混

合し、ジメチルスルホキシド (DMSO ; super dehydrated 99.0%、富士フイルム和光純薬) に溶解させることで調製した。溶液には、0.2 MのNH₄Cl (99.998% trace metals basis、Sigma-Aldrich) を添加材として加えた。

2次元ペロブスカイト材料として butane-1,4-diammonium diiodide (BDAl₂ ; 98.0%、東京化成工業)、N,N-dimethyl-1,3-propanediammonium diiodide (DMePDAI₂ ; 97.0%、東京化成工業)、hexane-1,6-diammonium iodide (HDAI₂、Sigma-Aldrich)、octane-1,8-diammonium iodide (ODAI₂ ; 98.0%、東京化成工業) を用いた。3次元ペロブスカイト上への2次元ペロブスカイトの積層に用いた溶液は、BDAl₂、DMePDAI₂、HDAI₂、ODAI₂ を2-プロパノール (Super Dehydrated 99.7%、富士フイルム和光純薬) に溶解させ調製した。

正孔輸送材料には Spiro-OMeTAD (SHT-263 Solarpur、Sigma-Aldrich) を用いた。Spiro-OMeTAD をクロロベンゼン (anhydrous 99.8%、Sigma-Aldrich) に溶解させて濃度 72 g/L の溶液を 1 mL 調製した。Li-TFSI (99.95% trace metal basis、Sigma-Aldrich) をアセトニトリル (anhydrous 99.8%、Sigma-Aldrich) に溶解させた濃度 520 g/L の溶液 17 μL、および 29 μL の 4-tert-butylpyridine (tBP ; 98%、Sigma-Aldrich) を、先述の Spiro-OMeTAD 溶液にドーパントとして加えた。

2. 2. 試料作製方法

2次元/3次元積層構造は2段階のバーコート法により作製した。1段階目のバーコートでは、MAPbI₃溶液またはMAPbI₂Br溶液をガラス基板上で掃引することにより、3次元ペロブスカイト薄膜を作製した。製膜時の基板の温度は 100 °C とした。用いた前駆体材料によって3次元ペロブスカイトの結晶方位が異なり、MAPbI₃溶液を用いた場合結晶方位 [200] または [112] が基板に対して垂直となる (200)/(112) 配向となり、MAPbI₂Br溶液を用いた場合、結晶方位 [110] が基板に対して垂直となる (110) 配向となった^{14),15)}。2段階目のバーコートでは、BDAl₂、DMePDAI₂、HDAI₂、ODAI₂ 溶液を3次元ペロブスカイト上で掃引する

ことで、3次元ペロブスカイトの一部を2次元ペロブスカイトに変換し、2次元/3次元積層構造を形成した。基板温度は80℃とした。それぞれのバーコートにおいて、コーティングバーの掃引速度は1000 $\mu\text{m/s}$ とし、基板とコーティングバーの間には0.7 mmの空隙を設けた。

2次元/3次元積層構造を用いた太陽電池素子は以下の手順で作製した。ガラスITO基板上に SnO_2 水分散液(44592 Tin(IV) oxide, 15% in H_2O colloidal dispersion, Alfa Aesar)を3000 rpmでスピコートすることにより、基板を SnO_2 で被覆した。前述の方法で2次元/3次元積層構造を作製した後、Spiro-OMeTAD溶液を3000 rpmの速度でスピコートし、真空蒸着法により金を60 nm蒸着した。

2. 3. 評価方法

薄膜の蛍光スペクトルを半導体レーザー(iBEAM-SMART-405-S, TOPTICA Photonics)、分光器(TRIAX 320, 堀場製作所)およびCCD検出器(Symphony, 堀場製作所)を備えた反射型顕微鏡(OP-LR-1, オプトキューブ)により測定した。測定における励起波長は404 nmである。蛍光スペクトル測定は、励起光をガラス基板側から入射するBottom-PL測定と、ペロブスカイト薄膜表面側から入射するTop-PL測定を実施した。

薄膜の蛍光顕微鏡像をUV-LED照射装置(ULEDN-102CT, エヌエスライティング)および冷却CMOSカメラ(ASI294MM Pro, ZWO)を備えた反射型顕微鏡(OP-LR-1, オプトキューブ)により観察した。色ガラスフィルター(V-42, 東芝)を用いて、UV-LED照射装置から出射される励起光のうち波長450 nm以下の光を試料に照射した。試料から得られた蛍光を、透過波長475–525 nmのバンドパスフィルター(#84-783, Edmund Optics)または透過波長725–775 nmのバンドパスフィルター(#84-788, Edmund Optics)を用いて特定の波長の光のみを取り出し、冷却CMOSカメラで撮影した。

2次元/3次元積層構造薄膜中の2次元ペロブスカイトの配向を、2次元検出器(HyPix-3000, リガク)を備えた全自動水平型多目的X線回折装置(SmartLab, リガク)を用いたGIWAXS測定により

評価した。入射X線には $\text{Cu K}\alpha$ 線を用い、X線の入射角は 0.2° 、試料と検出器までの長さは65 mmとした。2次元検出器の大きさは77.5 mm \times 38.5 mmであり、画素数は775 pixel \times 385 pixelである。

作製した太陽電池素子の電流密度-電圧特性(J - V 特性)を、疑似太陽光照射装置(OTENTO-SUN-III, 分光計器)およびソースメーター(2400, Keithley)を用いて評価した。また、太陽電池素子を室温、湿度 $40\pm 5\%$ の暗所に静置し、大気暴露が太陽電池特性に与える影響を評価した。一定時間経過後に素子の J - V 特性を先述の方法で評価した。

3. 実験結果

3. 1. 2次元/3次元積層構造の光学特性

図2(a)に MAPbI_3 薄膜に濃度50 mMの ODAl_2 溶液をバーコートして作製した2次元/3次元積層構造薄膜の蛍光スペクトルを示す。得られた蛍光スペクトルは、最大値で規格化を行った。Bottom-PLでは、波長780 nm付近にピークが得られ、この蛍光は3次元ペロブスカイトに由来する。したがって、積層構造の基板界面付近は3次元ペロブスカイトで構成されていると考えられる。一方、Top-PLでは、波長500 nmに蛍光ピークが得られた。波長500 nmの蛍光ピークは ODAPbI_4 に対応すると考えられることから、積層構造薄膜において膜表面付近は主に ODAPbI_4 で構成されていると考えられる。これらの結果から、3次元ペロブスカイト上に2次元ペロブスカイトを積層した2次元/3次元積層構造が形成されていることが分かった。

次に透過波長475–525 nmと透過波長725–775 nmのバンドパスフィルターを用いて、2次元/3次元積層構造薄膜の蛍光顕微鏡観察を行った。図2(b)に濃度2、10、50 mMの ODAl_2 溶液を MAPbI_3 薄膜にバーコートして作製した2次元/3次元積層構造薄膜の反射顕微鏡像および蛍光顕微鏡像を示す。蛍光顕微鏡像において、青色、赤色がそれぞれ透過波長475–525 nm、725–775 nmでの観察像を示す。

ODAl_2 溶液の濃度が2、10 mMの時、それぞれの蛍光顕微鏡像において2次元ペロブスカイト由来の蛍光は薄膜の一部でのみ得られ、2次元ペロブスカイトが3次元ペロブスカイト全体を被覆し

ていないことが分かった。特に濃度 2 mM では、3 次元ペロブスカイトの結晶粒界が放射状に形成され、2 次元ペロブスカイトは結晶粒界上に選択的に堆積していることが観察された。

濃度 50 mM の場合、3 次元ペロブスカイト由来の蛍光は得られず、2 次元ペロブスカイト由来の蛍光のみが得られた。したがって、濃度 50 mM の条件では、3 次元ペロブスカイト全体を 2 次元ペロブスカイトが厚く覆っていると考えられる。

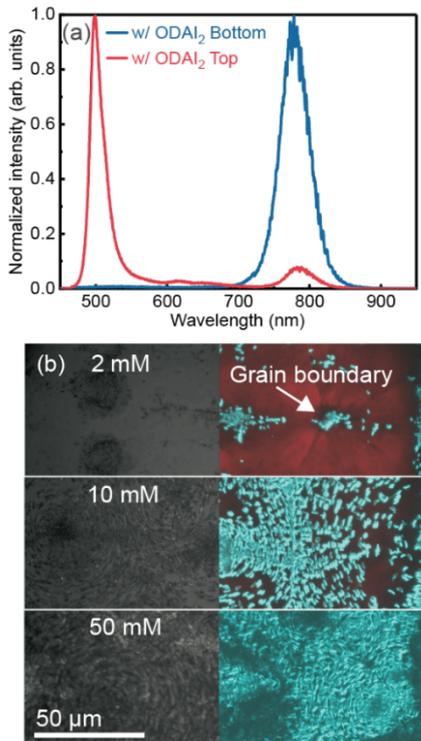


図2 (a) 50 mM の ODAI₂ 溶液と MAPbI₃ を用いて作製した 2 次元/3 次元積層構造の PL スペクトルと (b) 積層構造の光学顕微鏡像と PL 顕微鏡像

Fig. 2 (a) PL spectra of 2D/3D heterostructure fabricated with 50 mM of ODAI₂ solution and MAPbI₃. (b) Optical micrograph and PL micrograph of heterostructures.

3. 2. 2 次元ペロブスカイトの配向評価

図3(a)-(c)に (200)/(112) 配向 MAPbI₃ と濃度 2、10、50 mM の ODAI₂ 溶液を用いて作製した 2 次元/3 次元積層構造の GIWAXS 像を示す。濃度 2、10 mM の条件では Q_z 軸から斜め方向に回折が得られ、2 次元ペロブスカイトが傾斜配向すること

が分かった。ODAI₂ 濃度 50 mM の条件では、回折が円弧状に得られ、Q_z 軸から斜め方向の回折が強くなった。よって、(200)/(112) 配向 MAPbI₃ を用いた積層構造では、ODAI₂ 濃度に依存せず 2 次元ペロブスカイトの傾斜配向が支配的となることが分かった。

図3(d)-(f)に (110) 配向 MAPbI₂Br と濃度 2、10、50 mM の ODAI₂ 溶液を用いて作製した積層構造の GIWAXS 像を示す。ODAI₂ 濃度に依存せず Q_z 軸方向に回折が得られ、2 次元ペロブスカイトが水平に配向することが分かった。

以上の結果より、2 次元ペロブスカイトの配向は 3 次元ペロブスカイトの結晶方位によって決定され、(200)/(112) 配向 MAPbI₃ を用いて積層構造を作製した場合、傾斜配向の 2 次元ペロブスカイトが形成されることが分かった。

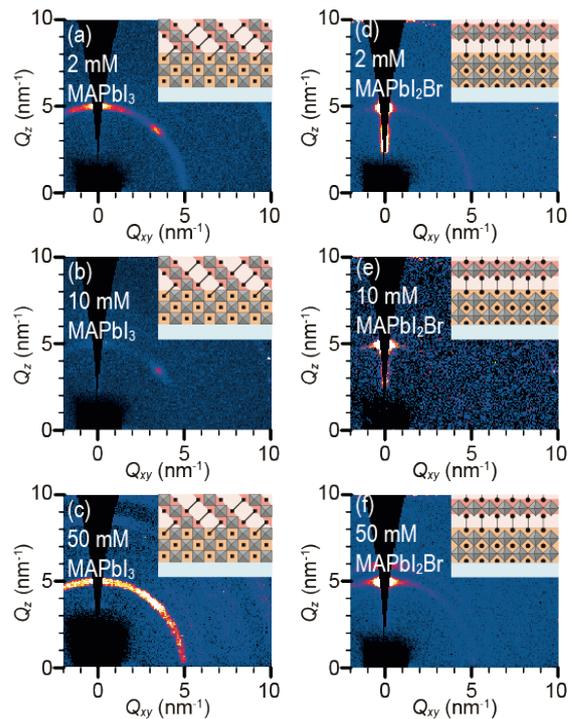


図3 ODAI₂ を用いて作製した積層構造の GIWAXS 像
 Fig. 3 GIWAXS images of heterostructure with ODAI₂.

2 次元ペロブスカイトの配向が 3 次元ペロブスカイトの結晶方位に依存して決定されるならば、図4(a) に示すように、3 次元ペロブスカイト結晶格子定数と 2 次元ペロブスカイトの八面体層間距離の整合が重要な要素となると考えられる。

そこで、2 次元ペロブスカイトの八面体層間の

距離を変更し、3次元ペロブスカイトの結晶格子定数と2次元ペロブスカイトの八面体層間距離の不整合が配向に与える影響を評価した。八面体層間の距離の変更は、2次元ペロブスカイト製膜に用いるジアンモニウムカチオンの長さを変更することで行った。

ここでは2次元ペロブスカイトの前駆体のジアンモニウムカチオンとして、BDAl₂、DMePDAl₂、HDAI₂を用いた。それぞれのジアンモニウムカチオンによって形成される2次元ペロブスカイトBDAPbI₄、DMePDAPbI₄、HDAPbI₄の八面体層間隔は10.1 Å、10.2 Å、11.3 Åであり、ODAPbI₄の八面体層間隔は13.2 Åであった。また、対応する3次元ペロブスカイトMAPbI₃の結晶格子間隔は12.6 Åである。

図4 (b)-(d) にMAPbI₃とBDAl₂、DMePDAl₂、HDAI₂溶液を用いて作製した2次元/3次元積層構造薄膜のGIWAXS像を示す。BDAl₂溶液、DMePDAl₂溶液およびHDAI₂溶液を用いて作製した2次元/3次元積層構造薄膜では、Q_z軸から斜め方向に回折が得られた。よって、それぞれの溶液で作製された2次元/3次元積層構造において、2次元ペロブスカイトは傾斜配向していることが分かった。この結果は、八面体層間隔10.1 ÅのBDAPbI₄から八面体層間隔13.2 ÅのODAPbI₄の間で2次元ペロブスカイトの傾斜配向が誘起されていることを示しており、3次元ペロブスカイトの結晶格子定数と2次元ペロブスカイトの八面体層間距離の不整合が存在する場合でも、3次元ペロブスカイトの結晶方位に依存した2次元ペロブスカイトの配向制御が実現されることが分かった。

3. 3. 積層構造素子の太陽電池特性

図5 (a) にMAPbI₂Brからなる3次元ペロブスカイトの太陽電池素子とODAl₂を用いた2次元/3次元積層構造素子の太陽電池特性を示す。3次元ペロブスカイト素子およびODAl₂濃度2、10 mMで作製した2次元/3次元積層構造素子では、逆電圧掃引時の光電変換効率は6-9%程度となった。一方ODAl₂濃度50 mMの太陽電池素子では、短

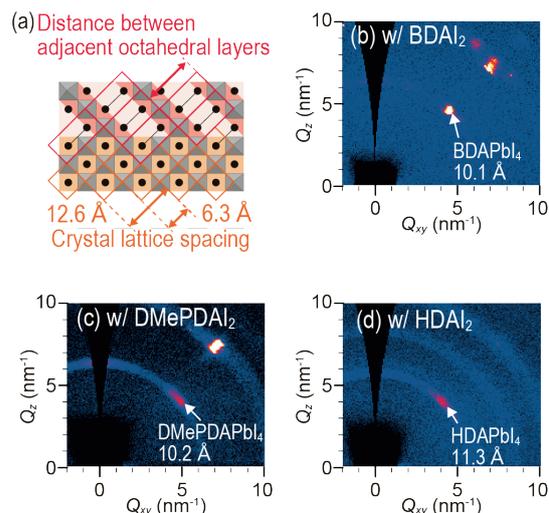


図4 (a) 積層構造における格子整合の概念図。(b) BDAl₂溶液、(c) DMePDAl₂溶液、(d) HDAI₂溶液とMAPbI₃を用いて作製した積層構造のGIWAXS像
Fig. 4 (a) Schematic illustration of lattice matching in heterostructure. GIWAXS images of heterostructure with (b) BDAl₂, (c) DMePDAl₂, (d) HDAI₂ solutions.

絡電流密度が他の条件の素子と比べ大幅に低下し、変換効率は1%以下となった。図2および図3より、濃度50 mMのODAl₂溶液で作製した2次元/3次元積層構造では、水平配向した2次元ペロブスカイトが3次元ペロブスカイト全体を覆っている。この2次元ペロブスカイトが、3次元ペロブスカイトから正孔輸送層や電極へのキャリア輸送を阻害したと考えられる。

図5 (b), (c) にMAPbI₃からなる3次元ペロブスカイトの太陽電池素子とMAPbI₃とODAl₂を用いた傾斜配向2次元/3次元積層構造素子の太陽電池特性および光電変換効率がODAl₂濃度依存性を示す。3次元ペロブスカイト素子およびODAl₂濃度2、10 mMで作製した2次元/3次元積層構造素子では、逆方向電圧掃引時に15-17%程度の変換効率が得られ、2次元ペロブスカイト積層により変換効率はほとんど低下しなかった。また、ODAl₂濃度50 mMの太陽電池素子においては、開放電圧および曲線因子が低下し、逆電圧掃引時の変換効率が13%以下に低下したが、MAPbI₂BrとODAl₂を用いた水平配向2次元/3次元積層構造と比較して変換効率の低下は抑制された。傾斜配向2次元/3次元積層構造では、2次元ペロブス

カイトが電荷の輸送を阻害しないため、3次元ペロブスカイト膜全体を2次元ペロブスカイトが覆った場合でも、電極への効率的な電荷輸送が実現されたと考えられる。

これらの結果より、2次元ペロブスカイトの配向が2次元/3次元積層構造の太陽電池特性に影響を与え、傾斜配向の2次元ペロブスカイトは電荷輸送に有利であることが分かった。

図5(d)にMAPbI₃を用いた3次元ペロブスカイト素子とMAPbI₃とODAI₂を用いた傾斜配向2次元/3次元積層構造素子の光電変換効率の経時変化を示す。光電変換効率は作製直後の変換効率で規格化した。

3次元ペロブスカイト素子の変換効率は約1000時間後に作製直後の57%まで低下したのに対し、2次元/3次元積層構造素子ではODAI₂濃度2mMの条件で79%、濃度10mMの条件で84%、濃度50mMの条件で102%となった。

2次元ペロブスカイトがMAPbI₃全体を被覆しないODAI₂濃度2、10mMの条件でも変換効率の低下が抑制された原因は2次元ペロブスカイトが3次元ペロブスカイトの結晶粒界上に堆積したことであるとされる。3次元ペロブスカイトの劣化は結晶粒界から起こりやすいため、安定性の高い2次元ペロブスカイトが結晶粒界上に堆積することで、結晶粒界由来の劣化を抑制できたと考えられる¹⁶⁾。

また、ODAI₂濃度50mMの条件では1000時間の大気暴露後も変換効率が低下しなかった。ODAI₂濃度50mMの条件では、2次元ペロブスカイトが3次元ペロブスカイト全体を厚く覆っており、これにより低濃度条件の素子と比べても高い安定性が実現できたと考えられる。

4. まとめ

3次元ペロブスカイトの結晶方位によって2次元ペロブスカイト配向を制御する手法を導入し、水平配向および傾斜配向を有する2次元/3次元積層構造を実現した。水平配向2次元ペロブスカイトが太陽電池中における電荷輸送を阻害したのに対し、傾斜配向2次元ペロブスカイトは3次元

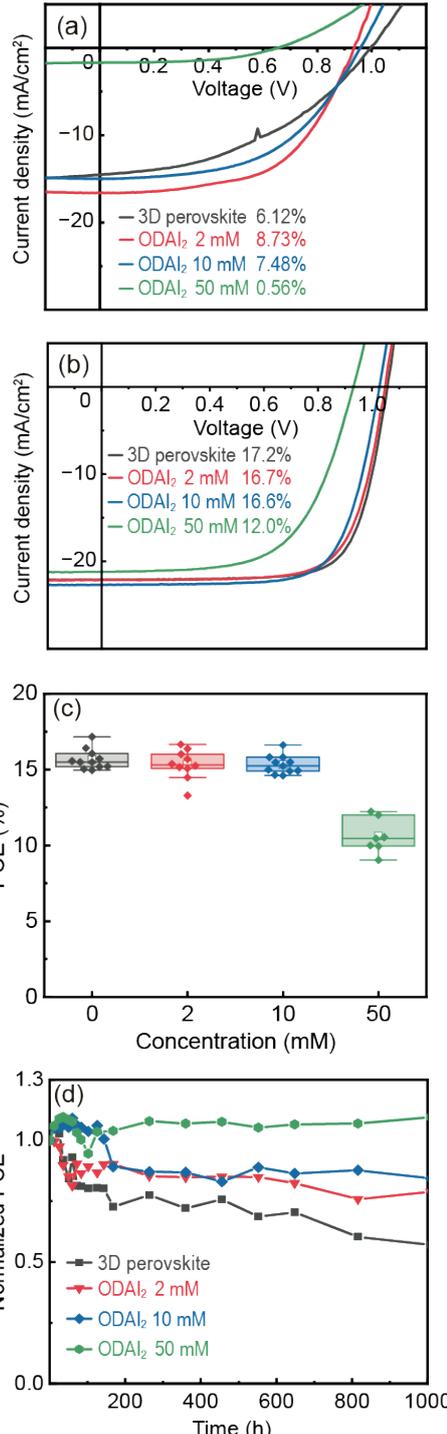


図5 (a) 水平配向 ODAPbI₄/MAPbI₃, (b) 傾斜配向 ODAPbI₄/MAPbI₃を用いた太陽電池の逆方向電圧掃引時のJ-V曲線。(c) 傾斜配向 ODAPbI₄/MAPbI₃を用いた太陽電池の光電変換効率のODAI₂濃度依存性。(d) ODAPbI₄/MAPbI₃積層構造太陽電池の安定性。

Fig. 5 J-V curves in reverse direction of the solar cells with (a) horizontally oriented ODAPbI₄/MAPbI₃, and (b) obliquely oriented ODAPbI₄/MAPbI₃. (c) ODAI₂ concentration dependence of PCE of solar cells with obliquely oriented ODAPbI₄/MAPbI₃. (d) The stability of solar cells with ODAPbI₄/MAPbI₃ heterostructure.

ペロブスカイトから電極への効率的な電荷輸送を実現した。また、傾斜配向2次元/3次元積層構造の太陽電池は、3次元ペロブスカイトを用いた太陽電池と比較して高い安定性を示し、2次元ペロブスカイトの配向制御が、高い変換効率と優れた安定性の両立に有効であることがわかった。

謝辞

本研究の一部は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム（課題番号：JPMJSP2138）、科学研究費補助金（課題番号：20H00391、21K18722、23H01446）、能村膜構造技術振興財団、八洲環境技術振興財団、池谷科学技術振興財団の援助のもと行われた。

参考文献

- 1) C. Ma, C. Leng, Y. Ji, X. Wei, K. Sun, L. Tang, J. Yang, W. Luo, C. Li, Y. Deng, S. Feng, J. Shen, S. Lu, C. Du, and H. Shi: *Nanoscale*, 8 (2016) 18309.
- 2) X. Jiang, J. Zhang, S. Ahmad, D. Tu, X. Liu, G. Jia, X. Guo, and C. Li: *Nano Energy*, 75 (2020) 104892.
- 3) G. Wu, R. Liang, M. Ge, G. Sun, Y. Zhang, and G. Xing: *Adv. Mater.*, 34 (2022) 2105635.
- 4) X. Zhao, T. Liu, and Y. Loo: *Adv. Mater.*, 34 (2022) 2105849.
- 5) H. Lai, B. Kan, T. Liu, N. Zheng, Z. Xie, T. Zhou, X. Wan, X. Zhang, Y. Liu, and Y. Chen: *J. Am. Chem. Soc.*, 140 (2018) 11639.
- 6) P. Chen, Y. Bai, S. Wang, M. Lyu, J. J.-H. J. Yun, and L. Wang: *Adv. Funct. Mater.*, 28 (2018) 1706923.
- 7) M. Tai, Y. Zhou, X. Yin, J. Han, Q. Zhang, Y. Zhou, and H. Lin: *J. Mater. Chem. A*, 7 (2019) 22675.
- 8) D. H. Cao, C. C. Stoumpos, O. K. Farha, J. T. Hupp, and M. G. Kanatzidis: *J. Am. Chem. Soc.*, 137 (2015) 7843.
- 9) H. Tsai, W. Nie, J.-C. Blancon, C. C. Stoumpos, R. Asadpour, B. Harutyunyan, A. J. Neukirch, R. Verduzco, J. J. Crochet, S. Tretiak, L. Pedesseau, J. Even, M. A. Alam, G. Gupta, J. Lou, P. M.

- Ajayan, M. J. Bedzyk, M. G. Kanatzidis, and A. D. Mohite: *Nature*, 536 (2016) 312.
- 10) M.-Y. Kuo, N. Spitha, M. P. Hautzinger, P.-L. Hsieh, J. Li, D. Pan, Y. Zhao, L.-J. Chen, M. H. Huang, S. Jin, Y.-J. Hsu, and J. C. Wright: *J. Am. Chem. Soc.*, 143 (2021) 4969.
- 11) G. Uzurano, N. Kuwahara, T. Saito, A. Fujii, and M. Ozaki: *ACS Mater. Lett.*, 4 (2022) 378.
- 12) G. Uzurano, K. Abe, T. Saito, A. Fujii, and M. Ozaki: *Appl. Phys. Express*, 15 (2022) 111002.
- 13) G. Uzurano, K. Abe, T. Saito, A. Fujii, and M. Ozaki: *Appl. Phys. Express*, 16 (2022) 041005.
- 14) M. Murata, T. Oizumi, M. Gi, R. Tsuji, M. Arita, A. Fujii, and M. Ozaki: *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 208 (2020) 110409.
- 15) A. Fujii, T. Oizumi, N. Kuwahara, G. Uzurano, T. Saito, Y. Yabuuchi, and M. Ozaki: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 61 (2022) SB1032.
- 16) Q. Wang, B. Chen, Y. Liu, Y. Deng, Y. Bai, Q. Dong, and J. Huang: *Energy Environ. Sci.*, 10 (2017) 516.

(2024年5月31日 受理)

著者略歴



鵜野 弦也

2019年3月大阪大学工学部電子情報工学科卒業。2020年3月同大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 博士前期課程修了。2023年3月同大学大学院工学研究科電気電子情報通信工学専攻 博士後期課程修了。同年4月より株式会社タムロン入社。博士（工学）。在学中は、主として2次元/3次元ペロブスカイト積層構造を用いた太陽電池の研究に従事。2022年 生産技術振興協会 海外論文発表奨励賞、2024年 第338回電気材料技術懇談会 優秀論文賞 受賞。応用物理学会会員。



阿部 健太郎

2022年3月大阪大学工学部電子情報工学科卒業。2024年3月同大学工学研究科電気電子情報通信工学専攻博士前期課程修了。同年4月エレクトクス工業株式会社入社。在学中は、主として2次元/3次元ペロブスカイト積層構造の光電変換特性に関する研究に従事。



齋藤 智樹

2021年3月大阪大学工学部電子情報工学科卒業。2023年3月同大学大学院工学研究科電気電子情報通信工学専攻博士前期課程修了。同年4月レーザーテック株式会社入社。在学中は、有機無機ハイブリッドペロブスカイト薄膜の結晶粒径拡大に関する研究に従事。電気学会会員。



三宅 紹心

2023年3月大阪大学工学部電子情報工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科博士前期課程進学。主としてトリプルカチオンペロブスカイトの一軸塗布製膜に関する研究に従事。応用物理学会会員。



菱田 大蔵

2021年上智大学理工学部物質生命理工学科卒業。2023年3月同大学大学院理工学研究科理工学専攻応用化学領域博士前期課程修了。同年4月中部電力株式会社入社。在学中は、主として二次元ペロブスカイトの配向性制御に関する研究に従事。応用物理学会会員。



竹岡 裕子

1996年3月上智大学理工学部化学科卒業。1998年3月同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。2001年3月東京大学大学院工学研究科博士後期課程修了。2001年4月上智大学理工学部助手。2002年11月～2005年3月JST さきがけ研究員兼務。2006年同講師、2010年同准教授、2018年同教授、現在に至る。工学博士。2023年より同大学研究推進センター長、主として、有機無機ペロブスカイト化合物、 π 共役系高分子、生分解性高分子に関する研究に従事。2020年応用物理学会第10回女性研究者研究業績・人材育成賞研究業績部門受賞。2023-2024年応用物理学会理事。



藤井 彰彦

1993年3月大阪大学工学部電子卒業。1997年同大学大学院工学研究科博士課程修了。1997年日本学術振興会特別研究員(PD)、1998年大阪大学大学院工学研究科助手、2006年同助教授、2007年同准教授を経て、2023年より大阪工業大学工学部教授。博士(工学)。1997～1998年ユタ大学物理学科博士研究員。主として、有機分子、導電性高分子の電子光物性と光機能応用に関する研究に従事。1996年電気関係学会関西支部連合大会奨励賞、1997年電子情報通信学会学術奨励賞、1999年応用物理学会講演奨励賞、応用物理学会賞、2006年ICNME 2006 Award受賞。応用物理学会、高分子学会 各会員。



尾崎 雅則

1983年3月大阪大学工学部電気卒業。1988年同大学大学院工学研究科博士課程修了。同年大阪大学工学部助手。1991年同講師。1994年同助教授を経て、2005年より同教授、現在に至る。工学博士。1994～1995年ユタ大学物理学科博士研究員。主として、液晶、有機光機能性分子・高分子、有機半導体・太陽電池、ナノフォトニクス材料に関する研究に従事。2013年応用物理学会フェロー、2015年日本液晶学会業績賞。日本液晶学会、応用物理学会 各会員。