

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：38005  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2018～2020  
課題番号：18K05266  
研究課題名（和文）Up-Scaling of Organic-Inorganic Hybrid Perovskite Solar Cells and Modules  
  
研究課題名（英文）Up-Scaling of Organic-Inorganic Hybrid Perovskite Solar Cells and Modules  
  
研究代表者  
Qi Yabing (Qi, Yabing)  
  
沖縄科学技術大学院大学・エネルギー材料と表面科学ユニット・教授  
  
研究者番号：10625015  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：メタルハライド・ペロブスカイト（PVSK）太陽電池の研究が進められていますが、この太陽電池技術を実用化に向けて前進させるためには、高い太陽エネルギー変換効率、長期安定性を持つスケールアッププロセスの開発が重要です。私たちの研究から得られた主な成果は以下の通りです。(1)ハイブリッド化学蒸着法（HCVD）に適したPVSK太陽電池材料の合成、(2)PVSK太陽電池モジュールの製造、(3)メチルアミンガスの処理。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

当研究チームは、HCVD技術とメチルアミンガス処理を用いたプロセスのスケールアップという主要な課題を達成した。Cs<sub>0.1</sub>FA<sub>0.9</sub>PbI<sub>2.9</sub>Br<sub>0.1</sub>ペロブスカイトにより、10cm×10cmの基板に効率9.3%の熱に耐久性のある安定した太陽電池モジュールをHCVD法で作製することができた。HCVD法で作製したCsを用いたペロブスカイト太陽電池の動作安定性試験では、太陽光1 SUN、25℃という現実的な光の照射下で、T80寿命が約500時間であった。この結果は、高効率、安定性に優れたペロブスカイト型太陽電池技術を実現するために、HCVDを使用することが有望な方向性であることを示している。

研究成果の概要（英文）：In the current stage of metal halide perovskite (PVSK) solar cell research, development of up-scaling processes with high solar energy power conversion efficiency, long-term stability, and minimum toxicity is important for moving forward this photovoltaic technology towards commercialization. The main findings from our research includes: (1) synthesis of suitable PVSK solar materials for the hybrid chemical vapor deposition (HCVD) process; (2) fabrication of PVSK solar modules; (3) methylamine-gas treatment.

研究分野：表面科学と半導体電子デバイス

キーワード：金属ハロゲン化物ペロブスカイト 太陽光発電技術 スケールアップ試験 太陽光パネル ハイブリッド化学蒸着 稼働寿命 パッシベーション効果 太陽エネルギー

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、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

Metal halide perovskite (PVSK) solar cells brought high expectations as the next-generation photovoltaic technology because of the readiness to form long-range ordering in crystal structure, abundance of raw materials, and easy manufacturing processability under 150 °C temperature. Currently, the best lab-scale single cells using PVSKs have reached extraordinary efficiencies as high as 25.5 % (<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>). However, these current state-of-the-art perovskite single cells have relatively small active areas (<1 cm<sup>2</sup>), which is impractical for realistic applications. Therefore, it is important to develop up-scaling processes (>100 cm<sup>2</sup>) with high solar energy power conversion efficiencies (PCEs) and stability. In this proposal, strategies to develop processes aiming at high PCE, high-throughput, and minimum batch-to-batch variation, and compatible with large-area perovskite solar cells and modules were aimed based on our (i) hybrid chemical vapor deposition (HCVD) and (ii) methylamine (MA) gas treatment.

### 2. 研究の目的

Similar to many other PVSK fabrication methods, PCE of PVSK solar cells grown by HCVD drops with increasing active area. In our current understanding, two challenges lead to low efficiencies in large area PVSK solar cells:

**(1) PVSK morphology:** Although HCVD has demonstrated initial success in growing uniform perovskite films, the quality of these films need be further improved.

**(2) Sheet resistance of transparent conducting oxide (TCO):** For large area solar modules, sheet resistance of TCO becomes increasingly important, because charge carriers need to travel long distances before being collected by electrodes.

### 3. 研究の方法

The proposed strategies for large-area PVSK solar modules were developed based on the following three tasks:

**(1) Synthesis of suitable PVSK materials for the HCVD process.** There are a large number of precursor molecules with tailored functionalities as candidates for synthesizing PVSK materials. Particular emphasis was given in fabricating these PVSK materials by making use of our newly developed method of HCVD.

**(2) Fabrication of PVSK solar modules.** Solar modules with large areas based on promising PVSKs identified in Task (1) were fabricated. Standard characterization techniques (current density vs voltage under simulated sun light, internal quantum efficiency,

and impedance spectroscopy) were carried out. Furthermore, long-term stability of above large area devices were tested under realistic continuous operation conditions with AM1.5 sunlight power illumination, 85 °C temperature, and 85% relative humidity.

**(3) MA-gas treatment.** The polycrystalline nature of PVSKs cause thin-films to be non-uniform with disconnected grains. The spaces in grain boundaries allow unwanted direct contact of electron and hole extraction layers, increasing carrier recombination. Therefore, thin-film morphology control is essential in attaining high PCEs. Previously, the MA-gas treatment method was demonstrated to be versatile in “healing” and improving further PVSK thin-film quality (Qi and coworkers, *J. Mater. Chem. A* 4, 2016, 2494-2500). We further developed a method of MA-gas exposure applied for large-area PVSK films.

#### 4 . 研究成果

**(1) Synthesis of suitable PVSK materials for the HCVD process.** We have achieved the main tasks of up-scaling processes based on our HCVD technique 1 - 3 . Interface engineering 3 and thermally stable  $\text{Cs}_{0.1}\text{FA}_{0.9}\text{PbI}_{2.9}\text{Br}_{0.1}$  perovskite allowed HCVD fabrication of large area solar modules with efficiencies of 9.3% fabricated on 10 cm x 10 cm substrates (designated area of 91.8 cm<sup>2</sup>) 2 . Operational stability tests of HCVD prepared Cs-based perovskite solar modules showed the T80 lifetime of ~500 h under the realistic light illumination of 1 sun and 25 °C. The short lifetime of perovskites in solar cells/modules is currently a major issue impeding further commercialization. Substantial fundamental knowledge on the degradation processes in perovskite materials were obtained 4 - 6 . Our works revealed the existence of reversible ( $\text{CH}_3\text{NH}_2 + \text{HI}$ ) and an irreversible ( $\text{CH}_3\text{I} + \text{NH}_3$ ) decomposition reaction in  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite 4 . Subsequent strategies for improving stability are currently being studied in my group 7 .

**(2) Fabrication of PVSK solar modules.** Most of perovskite solar modules (PSMs) have been fabricated employing  $\text{TiO}_2$  as electron transport layer (ETL), which requires high temperature processing and also results in instability issues. We have developed a room temperature sputtered  $\text{SnO}_2$  ETL fabrication protocol (under highly oxidizing reactive environment) for attaining high quality  $\text{SnO}_2$  films 3 . High-efficiency perovskite solar cells with 20.2% PCE and PSMs (5 cm x 5 cm) with 12.03% PCE were demonstrated. The extrapolated T80 operational lifetime of the solar module was 515 h, with a PCE decay rate of  $\sim 0.04\% \text{ h}^{-1}$ . In another study, carbon electrode-based perovskite solar cells have been recognized as a competitive low-cost candidate toward future practical applications 8 . We developed a low-cost carbon-based electrode that utilizes a cheap small-molecule semiconductor copper phthalocyanine (CuPc) as interface modifier

and dopant simultaneously. The modified carbon paste was applied in the fabrication of a flexible solar module using a 5 cm × 5 cm generating PCE of ~6% 8. The progresses on perovskite solar modules have been summarized in an invited review article 9.

**(3) MA-gas treatment.** We have further progressed to improve our CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>-treatment method leading to monolithic-type grains in perovskite films 10. On the basis of the gas–solid reaction with CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub> gas combined with chlorine-incorporated hydrogen lead triiodide, MAPbI<sub>3</sub>(Cl) perovskite films with thickness over 1 μm were fabricated in ambient conditions. Our proposed method significantly improved the grain boundary-related issues, which is reflected in high reproducibility with average PCE of 19.1% and low PCE standard deviation (±0.4%). Our protocol enabled an active area PCE of 15.3% for 5 cm × 5 cm PSMs. The un-encapsulated PSCs exhibited an excellent T80 lifetime exceeding 1600 h under continuous operation conditions in dry N<sub>2</sub> environment. This work demonstrates that the use of thick absorber films to realize perovskite-based photovoltaic technology with high efficiency, reproducibility, and stability is a promising direction. Further investigations are being conducted in my group employing HCVD and MA-gas treatment strategies.

#### <引用文献>

- 1 Y. Jiang, M. Remeika, Z. Hu, E.J. Juarez-Perez, L. Qiu, Z. Liu, T. Kim, L.K. Ono, D.-Y. Son, Z. Hawash, M.R. Leyden, Z. Wu, L. Meng, J. Hu, and Y.B. Qi, *Negligible-Pb-Waste and Upscalable Perovskite Deposition Technology for High-Operational-Stability Perovskite Solar Modules*. *Adv. Energy Mater.* **9** (2019) 1803047. DOI: 10.1002/aenm.201803047
- 2 L. Qiu, S. He, Y. Jiang, D.-Y. Son, L.K. Ono, Z. Liu, T. Kim, T. Bouloumis, S. Kazaoui, and Y.B. Qi, *Hybrid Chemical Vapor Deposition Enables Scalable and Stable Cs-FA Mixed Cation Perovskite Solar Modules with a Designated Area of 91.8 cm<sup>2</sup> Approaching 10% Efficiency*. *J. Mater. Chem. A* **7** (2019) 6920-6929. DOI: 10.1039/c9ta00239a
- 3 L. Qiu, Z. Liu, L.K. Ono, Y. Jiang, D.-Y. Son, Z. Hawash, S. He, and Y.B. Qi, *Scalable Fabrication of Stable High Efficiency Perovskite Solar Cells and Modules Utilizing Room Temperature Sputtered SnO<sub>2</sub> Electron Transport Layer*. *Adv. Funct. Mater.* **19** (2018) 1806779. DOI: 10.1002/adfm.201806779
- 4 E.J. Juarez-Perez, L.K. Ono, M. Maeda, Y. Jiang, Z. Hawash, and Y.B. Qi, *Photodecomposition and Thermal Decomposition in Methylammonium Halide Lead Perovskites and Inferred Design Principles to Increase Photovoltaic Device Stability*. *J. Mater. Chem. A* **6** (2018) 9604-9612. DOI: 10.1039/C8TA03501F
- 5 A. García-Fernández, E.J. Juarez-Perez, S. Castro-García, M. Sánchez-Andújar, L. K.

- Ono, Y. Jiang, and Y.B. Qi, *Benchmarking Chemical Stability of Arbitrarily Mixed 3D Hybrid Halide Perovskites for Solar Cell Applications*. *Small Methods* **2** (2018) 1800242. DOI: 10.1002/smt.201800242
- 6 E.J. Juarez-Perez, L.K. Ono, I. Uriarte, E.J. Cocinero, and Y. Qi, *Degradation Mechanism and Relative Stability of Methylammonium Halide Based Perovskites Analyzed on the Basis of Acid-Base Theory*. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** (2019) 12586-12593. DOI: 10.1021/acsami.9b02374
- 7 Sisi He, Longbin Qiu, Luis K. Ono, Yabing Qi, "How far are we from attaining 10-year lifetime for metal halide perovskite solar cells?" *Mater. Sci. Eng. R* **140**, 100545 (2020). DOI: 10.1016/j.mser.2020.100545
- 8 Sisi He, Longbin Qiu, Dae-Yong Son, Zonghao Liu, Emilio J. Juarez-Perez, Luis K. Ono, Collin Stecker, and Yabing Qi\*, "*Carbon-Based Electrode Engineering Boosts the Efficiency of All Low-Temperature-Processed Perovskite Solar Cells*" *ACS Energy Lett.* **4**, 2032-2039 (2019). DOI: 10.1021/acsenergylett.9b01294
- 9 Longbin Qiu, Sisi He, Luis K Ono, Shengzhong (Frank) Liu\*, Yabing Qi\*, "*Scalable Fabrication of Metal Halide Perovskite Solar Cells and Modules*" *ACS Energy Lett.* **4**, 2147-2167 (2019). DOI: 10.1021/acsenergylett.9b01396
- 10 Z. Liu, L. Qiu, E.J. Juarez-Perez, Z. Hawash, T. Kim, Y. Jiang, Z. Wu, S.R. Raga, L.K. Ono, S. Liu, and Y.B. Qi, *Gas-Solid Reaction based over One-Micrometer Thick Stable Perovskite Films for Efficient Solar Cells and Modules*. *Nat. Commun.* **9** (2018) 3880. DOI: 10.1038/s41467-018-06317-8

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計34件（うち査読付論文 34件 / うち国際共著 33件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Yuqiang Liu, Luis K. Ono, Yabing Qi	4. 巻 2
2. 論文標題 Organic additive engineering toward efficient perovskite light-emitting diodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 InfoMat	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/inf2.12098	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Zhifang Wu, Maowei Jiang, Zonghao Liu, Afshan Jamshaid, Luis K. Ono, Yabing Qi	4. 巻 10
2. 論文標題 High efficient perovskite solar cells enabled by multiple ligand passivation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Adv. Energy Mater.	6. 最初と最後の頁 1903696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aenm.201903696	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Sisi He, Longbin Qiu, Luis K. Ono, Yabing Qi	4. 巻 140
2. 論文標題 How far are we from attaining 10-year lifetime for metal halide perovskite solar cells?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mater. Sci. Eng. R	6. 最初と最後の頁 100545
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mser.2020.100545	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 該当する
1. 著者名 Jeremy Hieulle, Shulin Luo, Dae-Yong Son, Afshan Jamshaid, Collin Stecker, Zonghao Liu, Guangren Na, Dongwen Yang, Robin Ohman, Luis K. Ono, Lijun Zhang*, Yabing Qi*	4. 巻 11
2. 論文標題 Imaging of the Atomic Structure of All-inorganic halide perovskites	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. Lett.	6. 最初と最後の頁 818-823
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.9b03738	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 該当する

1. 著者名 Zonghao Liu, Luis K. Ono, Yabing Qi*	4. 巻 46
2. 論文標題 Additives in metal halide perovskite films and their applications in solar cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Energy Chem.	6. 最初と最後の頁 215-228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jechem.2019.11.008	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 該当する

1. 著者名 Lintao He, Hao Gu†, Xiaolong Liu*, Pengwei Li, Yangyang Dang, Chao Liang, Luis K. Ono, Yabing Qi*, Xutang Tao*	4. 巻 2
2. 論文標題 Efficient Anti-solvent-free Spin-Coated and Printed Sn-Perovskite Solar Cells with Crystal-Based Precursor Solutions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Matter	6. 最初と最後の頁 167-180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matt.2019.10.006	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 該当する

1. 著者名 Maowei Jiang, Zhanhao Hu, Zonghao Liu, Zhifang Wu, Luis K. Ono, Yabing Qi*	4. 巻 4
2. 論文標題 Engineering green-to-blue emitting CsPbBr <sub>3</sub> quantum-dot films with efficient ligand passivation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Energy Lett.	6. 最初と最後の頁 2731-2738
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsenenergylett.9b02032	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 該当する

1. 著者名 Longbin Qiu, Sisi He, Luis K. Ono, Yabing Qi*	4. 巻 10
2. 論文標題 Progress of Surface Science Studies on ABX <sub>3</sub> -Based Metal Halide Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Adv. Energy Mater.	6. 最初と最後の頁 1902726
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aenm.201902726	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 該当する

1. 著者名 Guoqing Tong, Luis K. Ono, Yabing Qi*	4. 巻 8
2. 論文標題 Recent progress of all bromide inorganic perovskite solar cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energy Technology	6. 最初と最後の頁 1900961
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ente.201900961	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 該当する

1. 著者名 Collin Stecker, Kexi Liu, Jeremy Hieulle, Robin Ohmann, Zhenyu Liu, Luis K. Ono, Guofeng Wang*, Yabing Qi*	4. 巻 13
2. 論文標題 Surface Defect Dynamics in Organic-Inorganic Hybrid Perovskites: From Mechanism to Interfacial Properties	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 12127-12136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.9b06585	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 該当する

1. 著者名 Joong Il Jake Choi, Muhammad Ejaz Khan, Zafer Hawash, Ki-jeong Kim, Hyunhwa Lee, Luis K. Ono, Yabing Qi*, Yong-Hoon Kim*, Jeong Y. Park*	4. 巻 7
2. 論文標題 Atomic-scale view of stability and degradation of single-crystal MAPbBr3 surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. A	6. 最初と最後の頁 20760-20766
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9TA05883D	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 該当する

1. 著者名 Guoqing Tong, Taotao Chen, Huan Li, Longbin Qiu, Zonghao Liu, Yangyang Dang, Wentao Song, Luis K. Ono, Yang Jiang*, Yabing Qi*	4. 巻 65
2. 論文標題 Phase transition induced recrystallization and low surface potential barrier leading to 10.91%-efficient CsPbBr3 perovskite solar cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Energy	6. 最初と最後の頁 104015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nanoen.2019.104015	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 該当する



1. 著者名 Longbin Qiu, Sisi He, Luis K Ono, Shengzhong (Frank) Liu*, Yabing Qi*	4. 巻 4
2. 論文標題 Scalable Fabrication of Metal Halide Perovskite Solar Cells and Modules	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Energy Lett.	6. 最初と最後の頁 2147~2167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsenerylett.9b01396	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 該当する

1. 著者名 Yong Wang, M. Ibrahim Dar*, Luis K. Ono, Taiyang Zhang, Miao Kan, Yawen Li, Lijun Zhang, Xingtao Wang, Yingguo Yang, Xingyu Gao, Yabing Qi*, Michael Gratzel*, Yixin Zhao*	4. 巻 365
2. 論文標題 Thermodynamically stabilized $\text{-CsPbI}_3$ -based perovskite solar cells with efficiencies >18%	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 591~595
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aav8680	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 該当する

1. 著者名 Luis K. Ono, Shengzhong (Frank) Liu*, Yabing Qi*	4. 巻 59
2. 論文標題 Reducing Detrimental Defects for High-Performance Metal Halide Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angew. Chem. Int. Ed.	6. 最初と最後の頁 6676~6698
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201905521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sisi He, Longbin Qiu, Dae-Yong Son, Zonghao Liu, Emilio J. Juarez-Perez, Luis K. Ono, Collin Stecker, and Yabing Qi*	4. 巻 4
2. 論文標題 Carbon-Based Electrode Engineering Boosts the Efficiency of All Low-Temperature-Processed Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Energy Lett.	6. 最初と最後の頁 2032~2039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsenerylett.9b01294	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 該当する

1. 著者名 Emilio J. Juarez-Perez*, Luis K. Ono, Yabing Qi*	4. 巻 7
2. 論文標題 Thermal degradation of formamidinium based lead halide perovskites into sym-triazine and hydrogen cyanide observed by coupled thermogravimetry - mass spectrometry analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. A	6. 最初と最後の頁 16912-16919
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9TA06058H	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 該当する

1. 著者名 Yan Jiang, Longbin Qiu, Emilio J. Juarez-Perez, Luis K. Ono, Zhanhao Hu, Zonghao Liu, Zhifang Wu, Lingqiang Meng, Qijing Wang, and Yabing Qi*	4. 巻 4
2. 論文標題 Reduction of lead leakage from damaged lead halide perovskite solar modules using self-healing polymer-based encapsulation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nat. Energy	6. 最初と最後の頁 585-593
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41560-019-0406-2	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 該当する

1. 著者名 E.J. Juarez-Perez, L.K. Ono, M. Maeda, Y. Jiang, Z. Hawash, and Y.B. Qi	4. 巻 6
2. 論文標題 Photodecomposition and Thermal Decomposition in Methylammonium Halide Lead Perovskites and Inferred Design Principles to Increase Photovoltaic Device Stability	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 9604-9612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8TA03501F	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 該当する

1. 著者名 L.K. Ono, T. Kim, Y. Jiang, Y.B. Qi, and S.F. Liu	4. 巻 3
2. 論文標題 "Heat Wave" of Metal Halide Perovskite Solar Cells Continues in Phoenix	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 American Chemical Society Energy Letters	6. 最初と最後の頁 1898-1903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsenenergylett.8b00964	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 該当する

1. 著者名 L.K. Ono, Z. Hawash, E.J. Juarez-Perez, L. Qiu, Y. Jiang, and Y.B. Qi	4. 巻 51
2. 論文標題 The Influence of Secondary Solvents on The Morphology of a Spiro-MeOTAD Hole Transport Layer for Lead Halide Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 294001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aacb6e	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 該当する

1. 著者名 L.K. Ono, Y.B. Qi, and S.F. Liu	4. 巻 2
2. 論文標題 Progress toward Stable Lead Halide Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Joule	6. 最初と最後の頁 1961-1990
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.joule.2018.07.007	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 該当する

1. 著者名 A. Garcia-Fernandez, E.J. Juarez-Perez, S. Castro-Garcia, M. Sanchez-Andujar, L.K. Ono, Y. Jiang, and Y.B. Qi	4. 巻 2
2. 論文標題 Benchmarking Chemical Stability of Arbitrarily Mixed 3D Hybrid Halide Perovskites for Solar Cell Applications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Small Methods	6. 最初と最後の頁 1800242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smt.201800242	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Z. Liu, L. Qiu, E.J. Juarez-Perez, Z. Hawash, T. Kim, Y. Jiang, Z. Wu, S.R. Raga, L.K. Ono, S. Liu, and Y.B. Qi	4. 巻 9
2. 論文標題 Gas-Solid Reaction based over One-Micrometer Thick Stable Perovskite Films for Efficient Solar Cells and Modules	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3880
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-06317-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 L. Qiu, Z. Liu, L.K. Ono, Y. Jiang, D.-Y. Son, Z. Hawash, S. He, and Y.B. Qi	4. 巻 19
2. 論文標題 Scalable Fabrication of Stable High Efficiency Perovskite Solar Cells and Modules Utilizing Room Temperature Sputtered SnO <sub>2</sub> Electron Transport Layer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 1806779
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.201806779	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 J. Hieulle, X. Wang, C. Stecker, D.-Y. Son, L. Qiu, R. Ohmann, L.K. Ono, A. Mugarza, Y. Yan, and Y.B. Qi	4. 巻 141
2. 論文標題 Unraveling the Impact of Halide Mixing on Perovskite Stability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 3515-3523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.8b11210	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 該当する

1. 著者名 Z. Wu, Z. Liu, Z. Hu, Z. Hawash, L. Qiu, Y. Jiang, L.K. Ono, and Y.B. Qi	4. 巻 31
2. 論文標題 Highly Efficient and Stable Perovskite Solar Cells via Modification of Energy Levels at the Perovskite/Carbon Electrode Interface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 1804284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.201804284	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Jiang, M. Remeika, Z. Hu, E.J. Juarez-Perez, L. Qiu, Z. Liu, T. Kim, L.K. Ono, D.-Y. Son, Z. Hawash, M.R. Leyden, Z. Wu, L. Meng, J. Hu, and Y.B. Qi	4. 巻 9
2. 論文標題 Negligible-Pb-Waste and Upscalable Perovskite Deposition Technology for High-Operational-Stability Perovskite Solar Modules	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Energy Materials	6. 最初と最後の頁 1803047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aenm.201803047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 L. Qiu, S. He, Y. Jiang, D.-Y. Son, L.K. Ono, Z. Liu, T. Kim, T. Bouloumis, S. Kazaoui, and Y.B. Qi	4. 巻 7
2. 論文標題 Hybrid Chemical Vapor Deposition Enables Scalable and Stable Cs-FA Mixed Cation Perovskite Solar Modules with a Designated Area of 91.8 cm <sup>2</sup> Approaching 10% Efficiency	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 6920-6929
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9ta00239a	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 該当する

1. 著者名 E.J. Juarez-Perez, L.K. Ono, I. Uriarte, E.J. Cocinero, and Y. Qi	4. 巻 11
2. 論文標題 Degradation Mechanism and Relative Stability of Methylammonium Halide Based Perovskites Analyzed on the Basis of Acid-Base Theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 American Chemical Society Applied Materials and Interface	6. 最初と最後の頁 12586-12593
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b02374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y.B. Qi,	4. 巻 64
2. 論文標題 A Redox Shuttle Imparts Operational Durability to Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science Bulletin	6. 最初と最後の頁 224-226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scib.2019.01.012	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 該当する

1. 著者名 Hu Zhanhao, Liu Zonghao, Ono Luis K., Jiang Maowei, He Sisi, Son Dae Yong, Qi Yabing	4. 巻 10
2. 論文標題 The Impact of Atmosphere on Energetics of Lead Halide Perovskites	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Energy Materials	6. 最初と最後の頁 2000908 ~ 2000908
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aenm.202000908	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Jiang Maowei, Hu Zhanhao, Ono Luis K., Qi Yabing	4. 巻 14
2. 論文標題 CsPbBr <sub>x</sub> I <sub>3-x</sub> thin films with multiple ammonium ligands for low turn-on pure-red perovskite light-emitting diodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Research	6. 最初と最後の頁 191 ~ 197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12274-020-3065-5	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 Jiang Maowei, Hu Zhanhao, Ono Luis K., Qi Yabing	4. 巻 4
2. 論文標題 CsPbBr <sub>x</sub> I <sub>3-x</sub> thin films with multiple ammonium ligands for low turn-on pure-red perovskite light-emitting diodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ChemPhotoChem	6. 最初と最後の頁 5271 ~ 5278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12274-020-3065-5	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 該当する

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Yabing Qi
2. 発表標題 A surface science approach to metal halide perovskite material and solar cell device research
3. 学会等名 The International Conference on Molecular Electronics and Devices (IC ME&D 2019), Busan, Korea, May 9 - 10, 2019. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yabing Qi
2. 発表標題 Perovskite Material and Solar Cell Research by Surface Science and Advanced Characterization
3. 学会等名 The 8th Sungkyun International Solar Forum (SISF 2019), Seoul, Korea, June 19 - 21, 2019. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yabing Qi
2. 発表標題 Investigations on Perovskite Materials and Solar Cells by Surface Science and Advanced Characterization
3. 学会等名 2019 10th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2019), Marina Bay Sands, Singapore, June 23-28, 2019. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yabing Qi
2. 発表標題 Investigations on Perovskite Materials and Solar Cells by Surface Science and Advanced Characterization
3. 学会等名 The 26th International Workshop on Active-Matrix Flat panel Displays and Devices (AM-FPD19), Ryukoku University Avanti Kyoto Hall, Kyoto, Japan, July 2-5, 2019. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yabing Qi
2. 発表標題 Investigations on Perovskite Materials and Solar Cells by Surface Science and Advanced Characterization
3. 学会等名 2019 MRS Fall Meeting & Exhibit, Boston, MA USA, December 1-6, 2019. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yabing Qi
2. 発表標題 Perovskite Material and Solar Cell Research by Surface Science and Advanced Characterization
3. 学会等名 2018 MRS Spring Meeting & Exhibit
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yabing Qi
2. 発表標題 Perovskite Material and Solar Cell Research by Surface Science and Advanced Characterization
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting & Exhibit
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yabing Qi
2. 発表標題 Instability of Lead Halide Perovskites
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting & Exhibit
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Self-Healing Polymer Brings PVSK Closer to Market  <a href="https://www.oist.jp/news-center/press-releases/%E2%80%9Cself-healing%E2%80%9D-polymer-brings-perovskite-solar-tech-closer-market">https://www.oist.jp/news-center/press-releases/%E2%80%9Cself-healing%E2%80%9D-polymer-brings-perovskite-solar-tech-closer-market</a>  Self-healing polymer brings pvsk closer to market  <a href="https://solaredition.com/self-healing-polymer-brings-perovskite-solar-tech-closer-to-market/">https://solaredition.com/self-healing-polymer-brings-perovskite-solar-tech-closer-to-market/</a>  Cracking Solar Cell Stability  <a href="https://www.oist.jp/news-center/press-releases/cracking-solar-cell-stability">https://www.oist.jp/news-center/press-releases/cracking-solar-cell-stability</a>  PVSK shows promise as an alternative to Si  <a href="https://www.sciencedaily.com/releases/2019/08/190808152457.htm">https://www.sciencedaily.com/releases/2019/08/190808152457.htm</a>  Scratching the surface of perovskites  <a href="https://phys.org/news/2019-11-surface-perovskites.html">https://phys.org/news/2019-11-surface-perovskites.html</a>  Scientists Boost Stability of Low-Cost  <a href="https://www.oist.jp/news-center/news/2019/1/11/scientists-boost-stability-low-cost-large-area-solar-modules">https://www.oist.jp/news-center/news/2019/1/11/scientists-boost-stability-low-cost-large-area-solar-modules</a>  Scientists boost stability of low-cost  <a href="https://www.sciencedaily.com/releases/2019/01/190122114937.htm">https://www.sciencedaily.com/releases/2019/01/190122114937.htm</a>  Boosting the Stability of Low-Cost  <a href="https://www.saurenergy.com/solar-energy-news/boosting-the-stability-of-low-cost-large-area-solar-modules">https://www.saurenergy.com/solar-energy-news/boosting-the-stability-of-low-cost-large-area-solar-modules</a>  Perovskite Solar Cells Towards Commercialization  <a href="https://www.oist.jp/news-center/news/2018/9/27/perovskite-solar-cells-leap-toward-commercialization">https://www.oist.jp/news-center/news/2018/9/27/perovskite-solar-cells-leap-toward-commercialization</a>  Perovskite solar cells toward commercialization  <a href="https://www.sciencedaily.com/releases/2018/09/180928104532.htm">https://www.sciencedaily.com/releases/2018/09/180928104532.htm</a></p>
--

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