

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01888

研究課題名（和文）高効率太陽電池材料としての鉛フリーペロブスカイト半導体の物性解明

研究課題名（英文）Elucidation of physical properties of lead-free perovskite semiconductors as high efficiency solar cell materials

研究代表者

松石 清人（Matsuishi, Kiyoto）

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：10202318

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：太陽電池材料を見据えた鉛フリーペロブスカイト半導体として、Sn系、Ge系、ダブルペロブスカイト系に着目した。Ge系とダブルペロブスカイト系では、温度・圧力変化に対して特徴的な構造変化が生じ、それに伴う顕著な電子・光物性の変化を捉えた。また、Sn系ペロブスカイト太陽電池においては、共添加エンジニアリングを活用した複数の添加剤を提案し、Snイオンの酸化抑制とペロブスカイト膜質の著しい改善、それによる電力変換効率とデバイス安定性の向上を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Sn系ペロブスカイト太陽電池において共添加剤による結晶安定化と高変換効率化及びデバイス安定化の指針を得ることができた点は、鉛フリーペロブスカイト太陽電池の実用化に向けて学術的且つ社会的意義がある。また、非鉛系ペロブスカイト半導体の単結晶を用いた精密物性測定により、構造物性と光・電子物性との相関を明らかにした点は、今後の鉛フリーペロブスカイト太陽電池の材料設計を行う上で貴重な知見となり、学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：As lead-free perovskite semiconductors for solar cell materials, we focused on Sn-halide, Ge-halide, and double perovskite systems. In Ge-halide and double perovskite systems, we elucidated characteristic structural changes with temperature and pressure which accompanied intriguing changes in electronic and optical properties. For Sn-halide perovskite solar cells, we proposed several additives by utilizing co-additive engineering and achieved the suppression of oxidation of Sn ions and the significant improvement of perovskite film quality, resulting in the improvement of power conversion efficiency and device stability.

研究分野：応用物性

キーワード：ペロブスカイト半導体 太陽電池 光物性 高圧物性 構造物性 鉛フリー

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。

1. 研究開始当初の背景

2012年に、 $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbI}_3$ を用いた有機と無機のハイブリッド系薄膜太陽電池として、変換効率が10%を超える新しいタイプのペロブスカイト太陽電池が報告された。それ以来、3年の間にこのペロブスカイト薄膜太陽電池の変換効率は19%を超え、ついに2016年にはSi系太陽電池に匹敵する22.1%に達した。このペロブスカイト太陽電池が高い変換効率を有する理由として、可視光から近赤外光域の広い波長領域でバンド間光吸収に起因する高い吸光度を有していること、励起状態が安定でキャリア拡散長が長いこと、バンドギャップ(1.5 eV)に対して太陽電池の開放電圧(V_{oc})がきわめて高いこと、などがそれまでに指摘されていた。しかしながら、この物質がなぜ安定な励起状態を持続するのか、なぜキャリア拡散長が長いのか、などの物性的説明は十分にはなされていなかった。また、太陽電池材料として鉛系ペロブスカイト半導体を市場に出すには環境への鉛害問題が立ちはだかり、そのため、鉛元素の代替となる金属カチオンを用いたペロブスカイト半導体を探索することが極めて重要であった。

この有機無機複合系ペロブスカイト太陽電池において、さらなる高効率化と結晶安定化への材料設計の指針を導き出すには、高い変換効率を示す物性機構は何か、有機分子を有するペロブスカイト構造に特有な格子変形に起因した構造物性とそれに伴う光・電子物性との相関に鍵となるそのヒントがあるのか、特に有機と無機の複合効果(協同的・量子的複合効果、外場下の複合効果)がどのようにこの物質系の特異な物性と結晶安定性に影響しているのか、それらの構造物性と光・電子物性の知見を土台にした鉛元素に替わる金属カチオンの最適候補はどの元素なのか、が学術的な課題となっており、本研究の中心的「問い」かけであった。

2. 研究の目的

太陽電池材料としてのペロブスカイト半導体において、有機と無機の複合効果(協同的・量子的複合効果、外場下の複合効果)及びペロブスカイト構造特有の格子変形に係わる構造物性とそれに伴う電子格子相互作用に起因した光・電子物性を明らかにすることによって、高い変換効率を示す物性機構を解明し、その知見を基に鉛に替わる金属カチオンを戦略的に探索して結晶安定性と高効率化への材料設計の指針を導き出す。

3. 研究の方法

(1) 鉛フリーの高効率太陽電池材料の探索を念頭に、有機分子を有するペロブスカイト構造に特有な構造物性と光・電子物性の関連を明らかにするために、非鉛系有機無機複合系ペロブスカイト半導体の良質な単結晶を溶液法によって作製した。次に、温度、圧力を変化させて分光実験を行い、電子状態、励起子状態、フォノン状態等を調べた。さらに、協同的構造変化を回折実験(X線、中性子線)によって調べた。

① 鉛に替わる4族元素としてGeを用いたペロブスカイト半導体 $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{GeI}_3$ 及び CsGeI_3 の単結晶を作製し、温度変化による発光現象と構造物性の変化及び構造相転移を調べた(粉末及び単結晶X線回折、粉末中性子線回折)。また、圧力印加による電子状態の変化(光吸収と発光)と構造変化(ラマン散乱)を調べた。

③ 金属カチオンに3族元素と5族元素を同時に用いたダブルペロブスカイト半導体($\text{Cs}_2\text{AgBiCl}_6$ 、Cuを添加した $\text{Cs}_2\text{AgBiCl}_6$ 、 $\text{Cs}_2\text{AgInCl}_2$)の単結晶を作製し、電子状態(光吸収、発光)の温度変化及び圧力変化、構造の圧力変化(ラマン散乱)不純物ドーピングによる電子状態の変化(光吸収、発光)や構造変化(ラマン散乱)等を調べた。

(2) 鉛フリーペロブスカイト太陽電池の高変換効率化と安定性向上を目指して、Sn系ペロブスカイト太陽電池に着目し、co-additive技術を活用したデバイス作製とデバイス特性評価を行った。co-additive剤として、Hydrazinium chloride、5-ammonium valeric acid iodide、Diaminomaleonitrile等を使用してデバイス特性の向上を目指した。国立研究開発法人物質・材料研究機構太陽光発電材料グループのAshrafur Islam博士の協力のもとで実施した。

4. 研究成果

(1) Ge系ペロブスカイト半導体の構造と光物性

Ge系ペロブスカイト半導体は、2015年に溶液法による作製方法が報告され、室温での結晶構造とバンドギャップが報告されていた。太陽電池デバイスとしては、2018年には4.92%の変換効率が報告された。しかし、Ge系ペロブスカイト半導体の基礎物性の理解は乏しかった。本研究では、 MAGeI_3 (MA:メチルアンモニウム)と CsGeI_3 においてまず低温での発光測定からこの物質の電子・励起子状態と相転移による発光スペクトルの変化を観測し、次に粉末及び単結晶X線回折並びに粉末中性子回折実験より構造物性の観点から電子・光物性を検討した。特に、温度低下に伴う有機分子の配向変化が半導体としての性質を特徴付けている無機部にどのような影響を及ぼしているのか、また、無機八面体の中心に位置する Ge^{2+} の変位を伴うヤーン・テラー

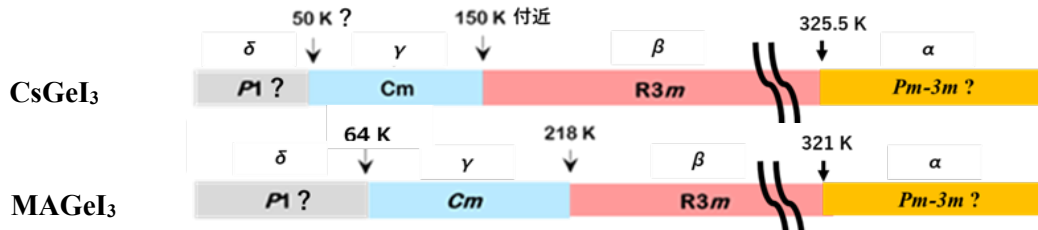


図1 CsGeI₃及びMAGeI₃の結晶構造の温度変化

歪みと八面体間の連結角の変化がどのように光物性に影響しているのかに焦点をおいた。

図1に熱測定と回折測定の結果に基づいて推定された相図を示す。温度変化による逐次相転移によって四つの相が現れることを明らかにした。中性子線回折の構造解析の結果、CsGeI₃に関しては、β相からγ相への構造相転移においては、GeI₆八面体同士の連結に回転が生じ、さらに、八面体それぞれ自体についても二種類のそれぞれ異なる方向に押し潰された形状の八面体となって歪んでいくことが明らかになった(図2)。発光スペクトル(図3)と照らし合わせてみると、この過程で生じた構造歪みと自由励起子との相互作用によって、自由励起子(Peak A, Peak B)の一部が自己束縛励起子(Peak C)を形成して発光していることが示唆された。MAGeI₃に関しては、MA分子を剛体として扱ったモデルで解析した結果、β相においてMA分子は単位格子内でCとNの位置はおおよそ決まっているものの、c軸を対称軸とした無秩序状態にあることが明らかになった(図4)。

MAGeI₃については、約4 GPaまでの発光測定、約1.5 GPaまでの光吸収測定、約3 GPaまでのラマン散乱測定を行った。発光測定では、圧力印加に伴い発光ピークの大きなレッドシフトを観測した。また、約2 GPa付近でそのシフト量に変化が見られ、相転移の存在が示唆された。発光強度は加圧過程の約1.2 GPa付近で最大となり(図5)、この圧力で励起光エネルギーが共鳴する特異な電子状態が存在していることが示唆された。光吸収測定では、他のペロブスカイト半導体と比べると非常に大きな加圧によるバンドギャップの狭小化を確認した(図6)。

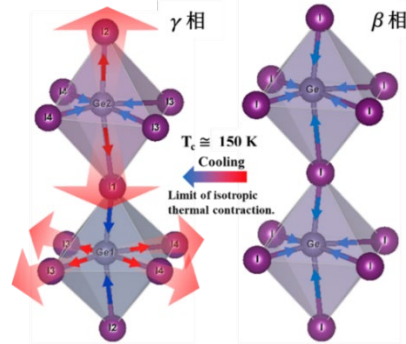


図2 CsGeI₃において、150 K 付近の構造相転移点より温度の低い結晶相(γ相)で観測される2つの異なる方向に歪んだGeI₆八面体

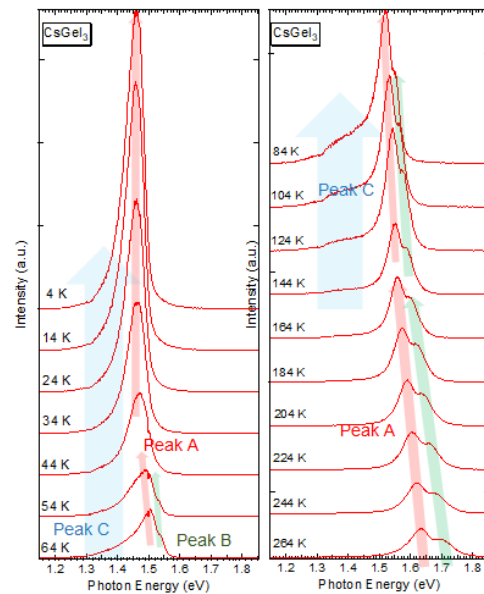


図3 CsGeI₃の発光スペクトルの温度変化

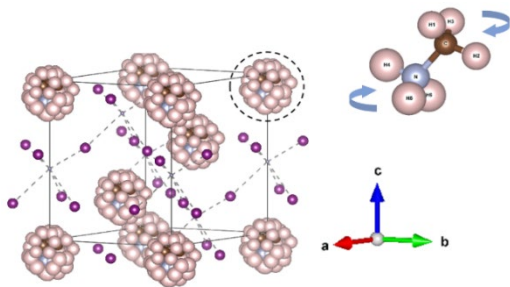


図4 リートベルト解析によるMAGeI₃の300 Kでの結晶構造

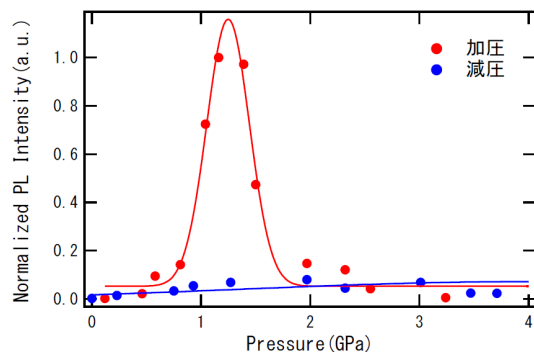


図5 CsGeI₃の発光強度の圧力変化

以上のように、Ge 系は温度や圧力等の外場の変化に対して構造の変化が大きい。よって、他のペロブスカイト半導体と比べて、Ge 系では有機無機間の相互作用も含めて顕著な構造変化とそれによる電子・光物性の変化を捉えることができた。Ge 系で得られた知見は他の系における今後の材料設計において活用されることが期待される。

(2) Ag・In 系ダブルペロブスカイト半導体の光物性

直接遷移型半導体であるダブルペロブスカイト半導体($\text{Cs}_2\text{AgInCl}_6$)単結晶において、温度及び圧力変化による物性変化を調べた。

バンドギャップは、低温になるにつれ Varshni 則に従って大きくなり、室温から 4 K までで約 0.1 eV ほど拡大した。発光の励起スペクトル測定では、バンドギャップエネルギー以上の励起では 2.45 eV 付近に発光ピークを、バンドギャップエネルギー以下の励起では 2.15 eV 付近に幅の広い発光ピークを観測した。また、バンドギャップ近傍の励起では 2.45 eV 付近のピーク強度が著しく弱まり、3.2 eV 付近に自由励起子による発光を観測した。発光の温度変化は、結晶表面の Cl 欠乏による表面欠陥発光と 2 種類の自己束縛励起子発光を考慮することで温度上昇によるレッドシフトを説明できた。

高圧ラマン散乱測定では、 143 cm^{-1} , 168 cm^{-1} , 301 cm^{-1} のラマンピークの変化を追った(図 7)。2 GPa 付近で半値幅の不連続な変化が観測され、この圧力付近で AgCl_6 と InCl_6 の歪が大きくなり、c 軸方向に伸びた正方晶への構造相転移が示唆された。

(3) Cu を添加したダブルペロブスカイト半導体 $\text{Cs}_2\text{AgBiCl}_6$ の光物性

ダブルペロブスカイト半導体 $\text{Cs}_2\text{AgBiCl}_6$ については、これまで作製の報告はあるが、詳細な光物性が調べられていなかった。本研究では、バンドギャップを変調するために $\text{Cs}_2\text{AgBiCl}_6$ に Cu を添加した単結晶(立方晶で空間群 $Fm\bar{3}m$, Bi に対して Cu を最大で 5% 程度含有)を作製し(図 8)、その光物性を調べた。

$\text{Cs}_2\text{AgBiCl}_6$ は間接ギャップ 2.66 eV を有し、Cu を添加していくと不純物準位が形成され、間接ギャップより低エネルギー側の領域(2.2 eV~2.6 eV)で光吸収が増大した。 $\text{Cs}_2\text{AgBiCl}_6$ の間接ギャップは室温から 5 K へ温度を下げると Varshni 則に従って 0.18 eV ほど増大した。その温度依存性は、Pb 系などのシングルペロブスカイトとは異なる挙動を示し、むしろ SnS_2 などの間接型半導体と似た挙動であった。

$\text{Cs}_2\text{AgBiCl}_6$ 、Cu 添加 $\text{Cs}_2\text{AgBiCl}_6$ とも 4 つの発光成分が観測された(2.0 eV 付近と 1.8 eV 付近に Cl 原子の欠陥による発光、1.4 eV 付近に Ag 原子のサイトを占める Bi 原子のアンチサイト欠陥発光)。なお、Cu を添加した試料では 1.8 eV の発光の強度が強まったことより、1.8 eV 付近の発光に不純物準位からの発光も寄与していると考えられる。一方、発光の励起スペクトル測定では、Cu の添加によって顕著な変化が観測された。

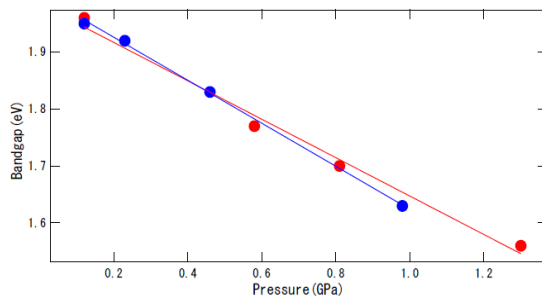


図 6 CsGeI_3 のバンドギャップの圧力変化

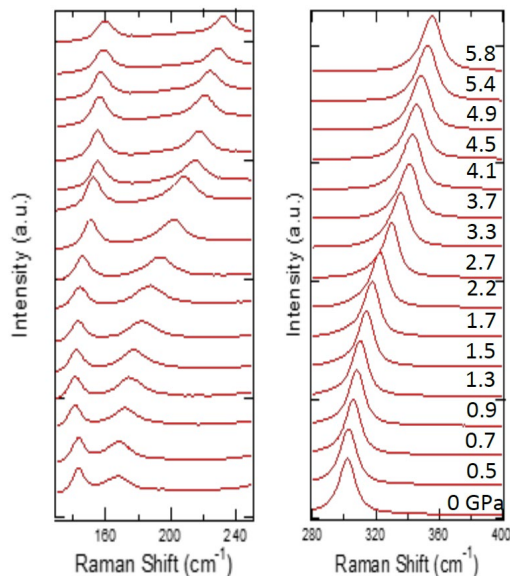


図 7 $\text{Cs}_2\text{AgInCl}_6$ のラマンスペクトルの圧力変化

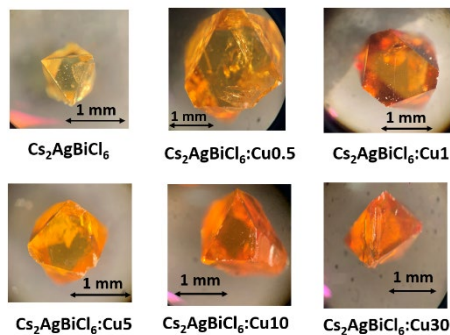


図 8 Cu を添加した $\text{Cs}_2\text{AgBiCl}_6$ 単結晶

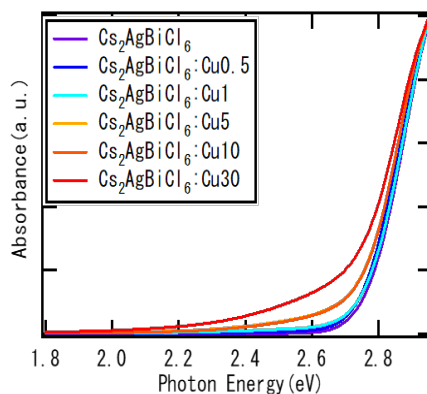


図 9 $\text{Cs}_2\text{AgBiCl}_6$ と Cu 添加 $\text{Cs}_2\text{AgBiCl}_6$ の光吸収スペクトル

ラマン散乱測定では、Cu を添加していくと、 T_{2g} と E_g の二つのラマンモードのピーク強度比が変化した。これらの結果と粉末 X 線回折測定から求めた格子定数の結果より、Cu が Cs サイトや Ag サイトに置換している可能性や共鳴ラマン散乱の可能性を検討した。

ダブルペロブスカイト半導体結晶への添加効果については、これまで研究がほとんど行われておらず、添加による電子状態の制御や、それを活用した新たなデバイス設計への進展が期待できる。

(4) Sn 系ペロブスカイト太陽電池の高変換効率化と安定性向上

ペロブスカイト型太陽電池 (PSC) には、水分や酸素に対する安定性および鉛含有であるが故の毒性の問題があった。ペロブスカイト膜のモルフォロジーおよび結晶性は PSC のデバイス性能に強く影響し、ピンホールのない均一で良質の膜形成は高効率で安定な PSC を得るための必要条件である。本研究では、高効率で安定した PSC を実現するために良質のペロブスカイト膜を形成する技術を開発することをまず一つの目的とし、ペロブスカイト膜の作製に広く使用されているアンチソルベント法を MAPbI_3 膜の形成に適用し、貧溶媒としてトルエン、クロロベンゼン、*p*-キシレンおよびエーテルを使用して、デバイス性能の最適化を試みた。異なる貧溶媒を使用すると、膜のモルフォロジーが変化し、それに対応してデバイス性能が変化することを明らかにした。特に、貧溶媒としてトルエンおよびクロロベンゼンを用いて成膜されたペロブスカイト膜は高い安定性を示し、膜の断面が単一粒界構造となつて暗所でも連続光照射下でも非常に効率的で安定した太陽電池性能を示すことを見出した[1]。

次に、ペロブスカイト膜の結晶化速度を制御するために、塩化銅 (II) を添加剤として使用して、 Cl^- イオンが PbI_2 と中間相を形成して結晶化速度を遅くすることを見出した。その結果、最適な光電子特性を有する、より大きくかつ均一な粒径のペロブスカイト膜が形成され、塩化銅を添加した PSC は添加をしていない PSC と比較して 56%ほど高い電力変換効率を示した[2]。

鉛の代替物として、優れた光起電力特性を示す Sn 系ペロブスカイト半導体に注目した。Sn 系 PSC は、デバイス性能が不十分であり、且つ安定性の問題を抱えていた。これは、 Sn^{2+} が酸化されやすい傾向にあり、ピンホールのない均一なペロブスカイト膜を形成することが困難であるためであった。添加剤として SnF_2 を用いると低い Sn^{4+} 含有の連続膜を形成できるが、10 モル%を超える SnF_2 の添加は相分離を引き起こし、多くのピンホールが出現することがわかってきた。そこで、塩化ヒドラジニウム ($\text{N}_2\text{H}_5\text{Cl}$) を用いた共添加エンジニアリングによって、Sn 系ペロブスカイト膜の結晶成長速度を制御し、 Sn^{2+} の酸化を抑えることを試みた。その結果、 $\text{N}_2\text{H}_5\text{Cl}$ の添加が Sn^{4+} の濃度を 20%まで減少させ、それによってキャリア再結合が抑制され、ピンホールのない均一な成膜が可能であるとわかった[3]。この膜質の著しい改善が、Sn 系の PSC の電力変換効率と安定性の両方の向上を実現させた[3]。

さらに、Sn 系 PSC の光照射安定性を改善するために、二官能基有機添加剤 5-ammonium valeric acid iodide (5-AVAI) を用いた。 ^1H NMR 分析から、前駆体溶液への 5-AVAI の添加によって 5-AVAI がその二官能基 (COOH^- および NH_3^+) を介して SnI_6^{4-} 八面体と水素結合を形成することがわかった。また、この水素結合は、ペロブスカイト膜の結晶化速度を減速させ、隣接する粒界を架橋して、優先配向を有するピンホールのない均一な結晶性の膜を形成することを見出した[4]。5-AVAI の添加によって、 0.25 cm^2 の面積を有する Sn 系 PSC において 3.4%から 7.0%へ電力変換効率を向上させた。さらに、この添加剤は、ペロブスカイト膜を水分および酸素から保護する疎水性被膜層を形成し、これにより空気安定性が向上し、連続光照射下で 100 時間にわたって初期性能を維持することを確認した[4]。

以上のように、Sn 系ペロブスカイト型太陽電池の作製において、共添加エンジニアリングを活用した添加剤を提案し[5]、成膜条件を検討してデバイス作製に取り組み、今後の実用化に向けた研究に貢献する重要で貴重な知見を得た。

<引用文献>

- [1] M. E. Kayesh, K. Matsuishi, T. H. Chowdhury, R. Kaneko, T. Noda, A. Islam, *Thin Solid Films* 663 (2018) 105-115.
- [2] M. E. Kayesh, K. Matsuishi, T. H. Chowdhury, R. Kaneko, T. Noda, A. Islam, *Electron. Mater. Lett.* 14 (2018) 712-717.
- [3] M. E. Kayesh, T. H. Chowdhury, K. Matsuishi, R. Kaneko, S. Kazaoui, J.-J. Lee, T. Noda, A. Islam, *ACS Energy Lett.* 3 (2018) 1584-1589.
- [4] M. E. Kayesh, K. Matsuishi, R. Kaneko, S. Kazaoui, J.-J. Lee, T. Noda, A. Islam, *ACS Energy Lett.* 4 (2019) 278-284.
- [5] M. A.-Shakour, T. H. Chowdhury, K. Matsuishi, I. Bedja, Y. Moritomo, A. Islam, *Solar RRL* 5 (2021) 2000606(1-24).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Emrul Kayesh Md., Matsuishi Kiyoto, Chowdhury Towhid H., Kaneko Ryuji, Lee Jae-Joon, Noda Takeshi, Islam Ashraful	4. 巻 663
2. 論文標題 Influence of anti-solvents on CH ₃ NH ₃ PbI ₃ films surface morphology for fabricating efficient and stable inverted planar perovskite solar cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 105 ~ 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsf.2018.08.015	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 Emrul Kayesh Md., Matsuishi Kiyoto, Chowdhury Towhid H., Kaneko Ryuji, Noda Takeshi, Islam Ashraful	4. 巻 14
2. 論文標題 Enhanced Photovoltaic Performance of Perovskite Solar Cells by Copper Chloride (CuCl ₂) as an Additive in Single Solvent Perovskite Precursor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Electronic Materials Letters	6. 最初と最後の頁 712 ~ 717
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13391-018-0075-5	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 Kayesh Md. Emrul, Chowdhury Towhid H., Matsuishi Kiyoto, Kaneko Ryuji, Kazaoui Said, Lee Jae-Joon, Noda Takeshi, Islam Ashraful	4. 巻 3
2. 論文標題 Enhanced Photovoltaic Performance of FASnI ₃ -Based Perovskite Solar Cells with Hydrazinium Chloride Coadditive	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Energy Letters	6. 最初と最後の頁 1584 ~ 1589
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsenerylett.8b00645	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 Kayesh Md. Emrul, Matsuishi Kiyoto, Kaneko Ryuji, Kazaoui Said, Lee Jae-Joon, Noda Takeshi, Islam Ashraful	4. 巻 4
2. 論文標題 Coadditive Engineering with 5-Ammonium Valeric Acid Iodide for Efficient and Stable Sn Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Energy Letters	6. 最初と最後の頁 278 ~ 284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsenerylett.8b02216	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 Abdel-Shakour Muhammad., Chowdhury Towhid H., Matsuishi Kiyoto, Bedja Idriss, Moritomo Yutaka, Islam Ashraful	4. 巻 5
2. 論文標題 High Efficiency Tin Halide Perovskite Solar Cells: The Chemistry of Tin (II) Compounds and Their Interaction with Lewis Base Additives during Perovskite Film Formation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Solar RRL	6. 最初と最後の頁 2000606 ~ 2000606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/solr.202000606	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 Abdel-Shakour Muhammad, Chowdhury Towhid H., Matsuishi Kiyoto, Moritomo Yutaka, Islam Ashraful	4. 巻 20
2. 論文標題 Chemical passivation of the under coordinated Pb2+ defects in inverted planar perovskite solar cells via -diketone Lewis base additives	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Photochemical & Photobiological Sciences	6. 最初と最後の頁 357 ~ 367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s43630-021-00023-z	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15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 石川 大輔、松石清人
2. 発表標題 CuとBiを用いた鉛フリーハライド系ダブルペロブスカイト半導体の作製と光物性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 目黒 悠介、松石清人
2. 発表標題 鉛フリーハライド系ダブルペロブスカイト半導体の作製と超高压下の光物性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久永尊瑚、松石清人
2. 発表標題 長鎖アミンでサイズ制御したCH ₃ NH ₃ PbBr ₃ ナノ粒子の作製と光学特性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 瑞生、鈴木 涼平、Tan Zhijian、高橋 美和子、神山 崇、松石 清人
2. 発表標題 Ge系ペロブスカイト半導体の構造と光物性
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

1. 発表者名 鈴木涼平，松石清人
2. 発表標題 Ge系ペロブスカイト半導体の作製と光物性
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久永尊瑚、松石清人
2. 発表標題 極性溶媒の異なるCH ₃ NH ₃ PbBr ₃ ナノ粒子の光学特性と安定性
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下村 直矢、松石 清人
2. 発表標題 ナフタレン発色団を有する鉛ハロゲン層状ペロブスカイトの発光におけるエネルギー移動:圧力効果とハロゲン置換効果()
3. 学会等名 第79回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Md. Emrul Kayesh, Kiyoto Matsuishi, Towhid H. Chowdhury, Ryuji Kaneko, Said Kazaoui, Jae-Joon Lee, Takeshi Noda, Ashrafu Islam
2. 発表標題 Co-additive Engineering of Lead Free Perovskites Solar Cells for Enhanced Photovoltaic Performance and Improved Stability
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Md. Emrul Kayesh, Kiyoto Matsuishi, Towhid H. Chowdhury, Ryuji Kaneko, Said Kazaoui, Jae-Joon Lee, Takeshi Noda, Ashrafu Islam
2. 発表標題 Co-additive Engineering with Bifunctional Additive for Enhanced Performance and Improved Stability of Sn-based Perovskites Solar Cells
3. 学会等名 International Conference on Perovskite and Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Md. Emrul KAYESH, Kiyoto MATSUIISHI, Jae-Joon LEE, Ashrafu ISLAM
2. 発表標題 Coadditive and Compositional Engineering for High Performance Lead-Free Perovskite Solar Cells
3. 学会等名 Global Photovoltaic Conference 2019 (GPVC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 瑞生、鈴木 涼平、高橋 美和子、神山 崇、松石 清人、片岡 邦光、萩原 雅人、鳥居 周輝
2. 発表標題 Ge系ペロブスカイト半導体の構造と光物性 ()
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 齋藤 瑞生、鈴木 涼平、高橋 美和子、松石 清人、神山 崇、萩原 雅人、鳥居 周輝、片岡邦光
2. 発表標題 Ge系ペロブスカイト半導体の結晶構造と相転移
3. 学会等名 日本結晶学会2020年度年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Muhammad Abdel-Shakour, Towhid H. Chowdhury, Kiyoto Matsuishi, Ashraful Islam
2. 発表標題 Suppression of the Pb ²⁺ defects in the perovskite films using Lewis-base additives in perovskite solar cells
3. 学会等名 International Online Conference on Hybrid Materials and Optoelectronic Devices (HYBRIDOE) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川大輔、松石清人
2. 発表標題 AgとBiを用いた鉛フリーハライド系ダブルペロブスカイト半導体の作製と光物性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 目黒悠介、松石清人
2. 発表標題 Ag・In系ダブルペロブスカイト半導体の作製と高圧下の光物性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021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
研究協力者	Kayesh Md. Emrul (Kayesh Md. Emrul)		
研究協力者	鈴木 涼平 (Suzuki Ryouhei)		
研究協力者	齋藤 瑞生 (Saito Mizuki)		
研究協力者	石川 大輔 (Ishikawa Daisuke)		
研究協力者	目黒 悠介 (Meguro Yusuke)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	服部 亮佑 (Hattori Ryosuke)		
研究協力者	Abdel-Shakour Muhammad (Abdel-Shakour Muhammad)		
研究協力者	下村 直矢 (Shimomura Naoya)		
研究協力者	久永 尊瑚 (Hisanaga Tougo)		
研究協力者	Islam Ashraful (Islam Ashraful)		
研究協力者	高橋 美和子 (Takahashi Miwako)		

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

韩国	Dongguk University			
----	--------------------	--	--	--