

一般セッション(口頭講演) | CS コードシェアセッション: 【CS.6】 タンデム太陽電池 (12.5 有機・ハイブリッド太陽電池、13.9 化合物太陽電池、16.3 シリコン系太陽電池のコードシェア)

🌱 2025年3月17日(月) 9:00 ~ 11:45 🏢 K405 (講義棟)

[17a-K405-1~9] CS.6 タンデム太陽電池 (12.5 有機・ハイブリッド太陽電池、13.9 化合物太陽電池、16.3 シリコン系太陽電池のコードシェア)

石河 泰明(青学大)、増田 淳(新潟大)、千葉 恭男(産総研)

9:00 ~ 9:30

[17a-K405-1]

[第46回優秀論文賞受賞記念講演] 高効率ペロブスカイト/ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池の実用サイズセル、モジュールへの展開

○山本 憲治¹、三島 良太¹、宇津 恒¹、足立 大輔¹ (1. (株) カネカ)

9:30 ~ 9:45

[17a-K405-2]

両面受光型ペロブスカイト/Siヘテロ接合薄型タンデムセルの作製

○齊藤 公彦¹、高橋 完次¹、穴戸 寛崇¹、石川 亮佑¹ (1. 東京都市大総研)

9:45 ~ 10:00

[17a-K405-3]

建物外壁用全ペロブスカイト電圧整合タンデム太陽電池モジュール

○竹田 康彦¹、山中 健一¹、加藤 直彦¹ (1. 豊田中研)

10:15 ~ 10:30

[17a-K405-4]

ペロブスカイト/Siタンデム太陽電池の屋外発電特性

○小長井 誠¹、藤井 皓大¹、石川 亮佑¹、平野 樹²、五反田 武志² (1. 東京都市大総研、2. 東芝エネルギーシステムズ)

10:30 ~ 10:45

[17a-K405-5]

ペロブスカイト太陽電池モジュールの屋外特性

○菱川 善博¹、東 孝樹¹、松岡 京¹、Mavlonov Abdurashid¹、原 知彦¹、根上 卓之¹、河野 悠¹、峯元 高志¹ (1. 立命館大)

10:45 ~ 11:00

[17a-K405-6]

MAPbI₃/SiGeタンデム太陽電池を指向したSi基板上SiGeの組成・製膜プロセス設計

○八木 健太¹、勝部 涼司¹、今井 友貴²、伊藤 耕平¹、鈴木 紹太³、南山 偉明³、ダムリン マルワン^{3,4}、宇佐美 徳隆^{1,2,5} (1. 名大院工、2. 名大未来機構、3. 東洋アルミ、4. 阪大院工、5. 名大未材研)

11:00 ~ 11:15

[17a-K405-7]

3ハライド型ワイドバンドギャップペロブスカイト太陽電池のモフォロジー改善

○杉本 英哉¹、高橋 菜々花¹、來福 至¹、石河 泰明¹ (1. 青山学院大)

◆ 奨励賞エントリー

11:15 ~ 11:30

[17a-K405-8]

逆構造ワイドギャップペロブスカイト太陽電池の V_{oc} 向上へ向けた電子輸送層の検討

○(M1)荻谷 航太¹、張 叢叢²、野々村 一輝³、粟井 文康²、久保 貴哉⁴、瀬川 浩司^{1,2,3,4} (1.東大院工、2.東大院総合、3.東大教養、4.東大先端研)

11:30 ~ 11:45

[17a-K405-9]

タンデムトップセルへ向けたペロブスカイト太陽電池のバンドギャップおよび膜厚検討

○粟井 文康¹、多田 圭志¹、久保 貴哉²、瀬川 浩司^{1,2} (1.東大院総合、2.東大先端研)

高効率ペロブスカイト/ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池の 実用サイズセル, モジュールへの展開

High Efficiency Perovskite/Heterojunction Crystalline Silicon Tandem Solar Cells: Towards Industrial-sized Cell and Module

カネカ¹ ◯山本 憲治, 三島 良太, 宇津 恒, 足立 大輔

Kaneka Corporation, ◯Kenji Yamamoto, Ryota Mishima, Hisashi Uzu, Daisuke Adachi

E-mail: Kenji.Yamamoto@kaneka.co.jp

ペロブスカイト/結晶シリコンタンデム太陽電池は, 世界の太陽電池市場の大部分を占める結晶シリコン太陽電池の理論限界を大きく超える変換効率が報告され, 次世代太陽電池として注目を集めている。

当社では, その実用化に向けた技術開発を進めており, ボトムセルにヘテロ接合結晶シリコン太陽電池を用いた二端子構造(下図(a)に一例を示す)の小サイズセルにおいて, セル変換効率32.1% (第三者機関測定)等の結果を得ている[下図(b)]。また, 実用サイズセルを用いたモジュール技術開発では, これまでに, ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池セルを用いた当社現行製品との比較で1.2倍以上の出力(自社測定)を瓦一体型太陽電池モジュール(モジュールサイズ: 約100cm×30cm)の試作品にて確認している。

本講演では, これらの結果に加え, モジュールの高出力化で不可欠となる光閉じ込め技術等のセル・モジュール設計に関する当社のこれまでの取り組み等を紹介するとともに, 実用化に向けた開発課題¹⁾について議論する。

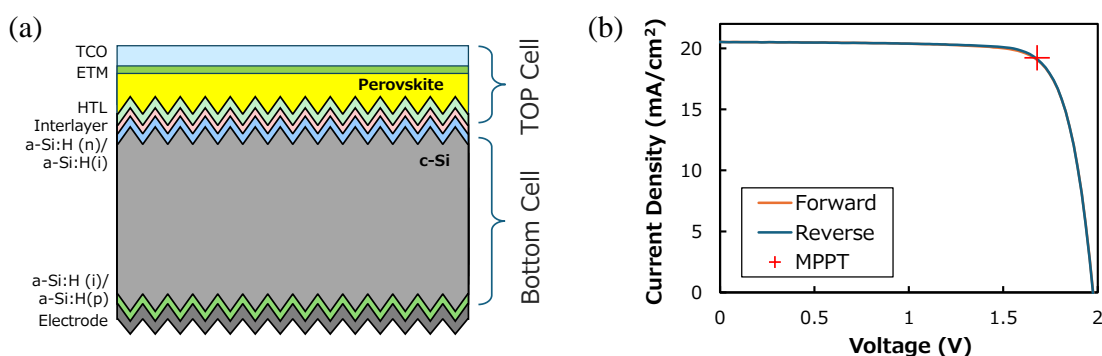


図 ペロブスカイト/ヘテロ接合結晶シリコンタンデム太陽電池セルの断面構造(a)と小サイズセルの第三者機関(産業技術総合研究所)での電圧-電流特性の測定結果(面積:1.018cm², MPPT保持後セル変換効率32.1%)(b)の一例

謝辞 これらの成果の一部は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)との共同研究の結果, 得られたものです。

参考文献

- 1) K. Yamamoto, R. Mishima, H. Uzu, and D. Adachi, Jpn. J. Appl. Phys. **62** SK1021 (2023).

両面受光型ペロブスカイト/Si ヘテロ接合薄型タンデムセルの作製 Fabrication of bifacial perovskite/Si-heterojunction thin tandem solar cells

東京都市大学 総合研究所

○齊藤 公彦, 高橋 完次, 尖戸 寛崇, 石川 亮佑

Tokyo City Univ. °Kimihiko Saito, Kanji Takahashi, Hirotaka Shishido
and Ryouyusuke Ishikawa

E-mail: kisaitou@tcu.ac.jp

薄型 Si 基板を用い、高効率・軽量かつ屈曲性を有するペロブスカイト (PVK) /Si ヘテロ接合 (SHJ) タンデム型太陽電池の開発を行っているが、Si 厚みを $<100\mu\text{m}$ と薄型化するため、長波長域における外部量子効率低下によるボトムセル電流の低下という問題を有していた。これを改善すべく両面受光型とした薄型 PVK/SHJ タンデムセルを作製したので報告する。

作製したセルの構造 (セルサイズは 1cm^2) を図 1 に示す。SHJ ボトムセルは、厚み $\sim 80\mu\text{m}$ の CZ Si 基板に対し、トップセル側表面には高さ $<1\mu\text{m}$ のマイクロテクスチャ ($\mu\text{-Tex}$)、裏面側表面には高さ $2\sim 3\mu\text{m}$ 程度の通常テクスチャを形成し、裏面電極に Ag グリッド電極を用いることで裏面受光可能な構造とした。一方、トップセル PVK については、裏面への照射光強度により電流バランスする PVK 膜の最適バンドギャップ (E_g) が変化することから¹⁻³⁾、今回は 0.3SUN 程度でバランスすると考えられる $E_g\sim 1.5\text{eV}$ の $\text{Cs}_{0.05}\text{FA}_{0.95}\text{PbI}_3$ 組成とした膜を用い、 $\mu\text{-Tex}$ 上にスピコート形成した MeO-2PACz 正孔輸送層上にスピコートと貧溶媒処理によって形成を行った。

裏面側に無反射シートを設置して測定した外部量子効率 (EQE) の結果を図 2 に示す。比較として、 $E_g\sim 1.68\text{eV}$ の $\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.77}\text{MA}_{0.23})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.77}\text{Br}_{0.23})_3$ ⁴⁾組成となる様にトップセルを形成したタンデムセル (裏面側 Ag ベタ電極) の EQE スペクトルも示す。この図で示される通り、PVK 膜の狭バンドギャップ化によるトップセル吸収端の長波長シフトにより、トップセル電流が $3.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 増大して $22.1\text{mA}/\text{cm}^2$ が得られた。即ち、裏面照射によるボトムセル電流増大によりトップセルとの電流バランスが実現できれば、薄型 Si 基板を用いても $I_{\text{sc}}>\sim 22\text{mA}/\text{cm}^2$ のタンデムセルが形成できることが示唆された。

謝辞：本研究は NEDO の支援を受けた。

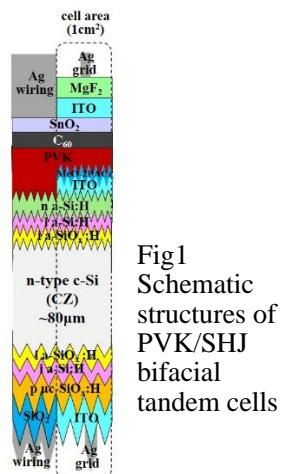


Fig.1
Schematic
structures of
PVK/SHJ
bifacial
tandem cells

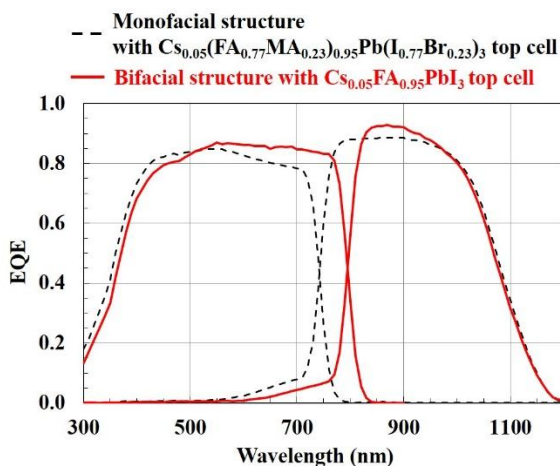


Fig.2
EQE spectra of
the PVK/SHJ
tandem cells

- 1) J. Chantana et.al., Solar Energy 220, 163–174 (2021)
- 2) M. R. Khan et. al., Appl. Phys. Lett. 107, 223502 (2015)
- 3) A. Onno et. Al., Joule 4, 580–596, March 18 (2020)
- 4) A. Al-Ashouri et. al., Science, 370, 1300Y (2020)

建物外壁用全ペロブスカイト電圧整合タンデム太陽電池モジュール

All-perovskite voltage-matched tandem solar modules for wall integration

豊田中研 [○]竹田 康彦, 山中 健一, 加藤 直彦

Toyota Central R&D Labs., Inc. [○]Yasuhiko Takeda, Ken-ichi Yamanaka, Naohiko Kato

E-mail: takeda@mosk.tytlabs.co.jp

有機-無機ハイブリッドペロブスカイト(PVK)太陽電池のタンデム化は、変換効率の点では結晶シリコン太陽電池との組み合わせが優位である。しかし、モジュールの大型化や軽量・フレキシブル化、更に量産性の観点からは、モノシック直列接続構造をもつ全 PVK モジュールが望まれる。これまでに、建物屋根あるいはメガソーラーへの設置を想定し、耐久性が十分に高い Br リッチワイドバンドギャップ組成の PVK を使わなくても高い変換効率を得られる、電圧整合 (Voltage-matched, VM) 及び電流整合 (Current-matched, CM) タンデム太陽電池モジュール (Fig. 1) を提案した[1,2]。これを基にして、建物外壁への設置に適したモジュールの構成を検討した。

バンドギャップの異なる PVK 単接合セルの既報データを基にして、単セルの電流密度-電圧特性を 2 ダイオードモデルにより表した。これを用いて、VM、CM、及び 4 端子 (4T)、2 端子 (2T) モジュールの変換効率を計算した。各設置方法の平均的な気象条件にて変換効率が最大となるように PVK のバンドギャップ、セル幅、透明導電膜厚さを最適化した。1 年間の気象データを用いて[3]、最適化された各モジュールの北中米 8 地点における年間平均変換効率 (日射量の積算値に対する発電量の積算値) を計算した。

最適傾斜角設置の場合は、2T 以外の 3 種類のモジュールの変換効率には大差ない (Fig. 2(a))。これは、平均光子エネルギー (Average photon energy, APE) の地域差及び時間変動が小さいからである。ところが南向き垂直面に設置されると、APE の変化が大きいので、トップ/ボトムモジュールの電流整合が求められる CM 及び 2T は効率が低下する (Fig. 2(b))。一方、VM に求められる電圧整合は APE あるいはトップ/ボトムモジュールの吸収光子数の変化の影響を受けにくいので、両モジュールが独立に動作する 4T に匹敵する高い効率が得られる。東西向き設置の場合も同様である。4T からは電圧が異なる 2 系統が出力されるのに対し、VM は 1 系統出力であるから、実用上より優れたモジュール構成であると結論される。

[1] Y. Takeda, et al., Prog. Photovolt.: Res. Appl. **32**, 442 (2024).

[2] 竹田, 他, 2024 年応用物理学会秋季学術講演会 17p-A21-2; PVSEC-35 Tu3-Pc1-16.

[3] National Solar Radiation Database, available from: <https://nsrdb.nrel.gov/>.

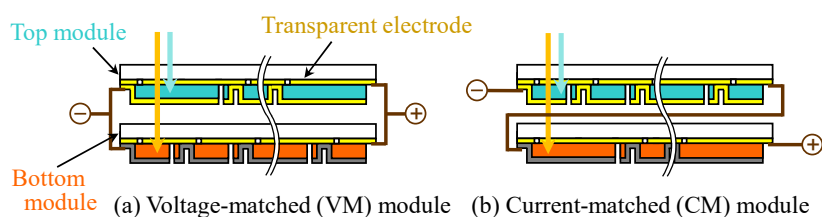


Fig. 1 Monolithically series-interconnected all-PVK tandem solar modules

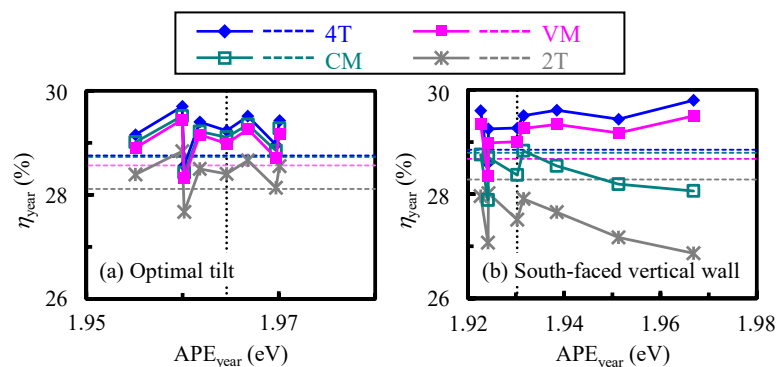


Fig. 2 Annually averaged conversion efficiencies (η_{year}) and APE (APE_{year}) in Seattle, Philadelphia, Golden, Atlanta, Phenix, New Orleans, Havana, and Panama. The vertical dotted lines indicate the APE value used for the structure optimization. The resultant efficiencies of the optimization are indicated by the horizontal broken lines.

ペロブスカイト/Si タンデム太陽電池の屋外発電特性

Outdoor Power Generation Characteristics of Perovskite/Si Tandem Solar Cells

東京都市大総研¹, 東芝エネルギーシステムズ², 小長井 誠¹, 藤井 皓大¹, 石川 亮佑¹,
平野 樹², 五反田 武志²

Tokyo City Univ.¹, Toshiba ESS², ^oMakoto Konagai¹, Kouta Fujii¹, Ryouyusuke Ishikawa¹,
Itsuki Hirano², Takeshi Gotanda², E-mail: mkonagai@tcu.ac.jp

1. はじめに

東京都市大グループでは、これまで NIMS で試作、封止された高効率ペロブスカイト(PVK)太陽電池の屋外発電特性を報告してきた。今回は、東芝 ESS 社から提供されたペロブスカイト/Si タンデム太陽電池²⁾の屋外発電特性の測定結果、ならびにペロブスカイトトップセルの劣化がタンデム太陽電池の劣化に及ぼす影響を理論解析した。

2. ペロブスカイト/Si タンデム太陽電池の屋外発電特性

測定に用いたタンデム太陽電池は、円筒型のガラスに封止されたもの(面積 0.17cm²)である。2024 年 4 月から屋外発電特性評価を始めたサンプルは、2 軸追尾測定系に設置されており、8 月から測定を開始したサンプルは、南向き仰角 35° に固定されている。2 軸追尾系に設置されたサンプルは、MPPT 測定、ならびに 1 日に 3 回の I-V curve tracing を行っている。Fig.1 は正午の太陽電池特性の変化を示したものである (Pin ~1kW/m², Reverse scan のみ表示)。曲線因子の劣化等により、変換効率は 18% から 7% まで劣化している。

一方、8 月から測定を開始したサンプルでは、MPPT 測定とともに、月に 1 度程度の I-V curve tracing を行っている。詳細は当日報告するが、変換効率は、初期値の 23% から 16% 程度まで劣化しており、劣化傾向に大きな違いは現れていない。

3. タンデム太陽電池の劣化特性の理論的考察

これまでのペロブスカイト太陽電池の屋外発電特性測定からは、特に気温の高い夏場に大きく曲線因子が劣化することが分かっている。そこで、曲線因子の劣化を直接抵抗の増加と仮定し、ペロブスカイトトップセルの直接抵抗が、タンデム太陽電池の特性に与える影響を理論解析した。その結果、Fig.2 に示すようにボトム律速のタンデム太陽電池の方が、曲線因子の劣化が小さく観察されることが分かった。

参考文献: 1) M. Konagai et. al, Proc. PVSEC-34, Shenzhen, China, Nov.6-10 (2023) pps.222-225

2) 塩川他、2023 年第 70 回応用物理学会春季学術講演会、上智大学 (2023) 18p-A408-2

謝辞: 本研究の一部は、東京都市大学「重点推進研究」ならびに東京都市大学と東芝 ESS の共同研究契約により実施された。またタンデム太陽電池セルを東芝エネルギーシステムズと共同開発した電気通信大学の早瀬修二教授、産業技術総合研究所の松井卓矢研究チーム長、齋均上級主任研究員及び、円筒モジュール化にご協力頂いたフジコー、CKD、ウシオ電気に感謝する。

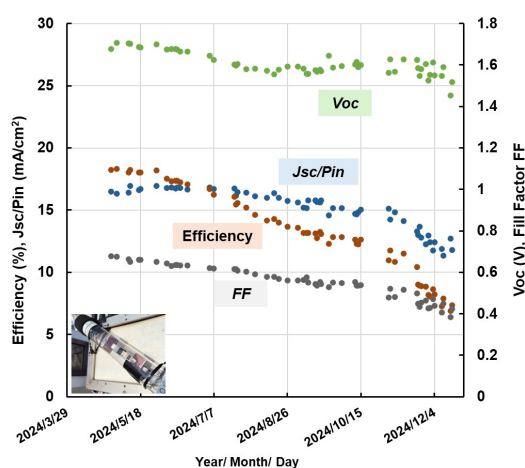


Fig.1 Changes in solar cell parameters (at 12:00) of a sample fixed on a two-axis tracking system.

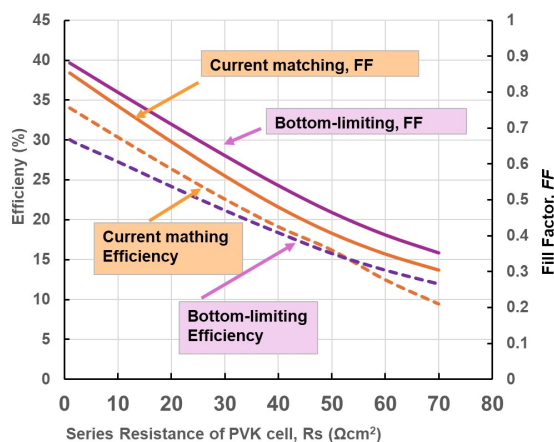


Fig.2 Effect of degradation of perovskite top cell on the performance of tandem solar cells.

ペロブスカイト太陽電池モジュールの屋外特性

Outdoor performance of Perovskite PV modules

立命館大学 ◯菱川善博, 東孝樹, 松岡京, A. Mavlonov, 原知彦,

根上卓之, 河野 悠, 峯元 高志

Ritsumeikan University, Y. Hishikawa, K. Azuma, K. Matsuoka,

A. Mavlonov, T. Hara, T. Negami, Y. Kawano, T. Minemoto

E-mail: y-hishi@fc.ritsumeai.ac.jp

ペロブスカイト太陽電池 (PSC) モジュールの屋外における実性能のデータは現在まだ少なく、多くのシステムにおける実証が重要である。本研究では屋外での様々な設置形態での発電性能を調べるために、4つの方位角 (東西南北) と3つの傾斜角 (30°, 15°, 2°) に設置した PSC モジュールの屋外実性能の検証と解析を行った。各方位角、傾斜角にフレキシブル PSC モジュールを設置し、PC 制御の電子負荷によって各モジュールの MPPT 制御を行い、約 10 分毎にモジュール電流電圧 (IV) 特性を計測した。下図に晴天日 2024/10/6 における各モジュールの MPPT 電圧 V_{mppt} 、電流 I_{mppt} および出力 P_{mppt} を示す。各方位角・傾斜角におけるモジュールの発電性能はほぼ照度によって予想される変化を示している。並行して 25cm 角モジュールでの長期屋外暴露も行っており、学会当日には方位角・傾斜角が経時変化に及ぼす影響も議論する予定である。

謝辞：本研究は NEDO 委託研究の一環として実施されたものであり、関係各位に感謝致します。フレキシブル PSC モジュールを提供いただいた積水化学工業株式会社様に感謝致します。

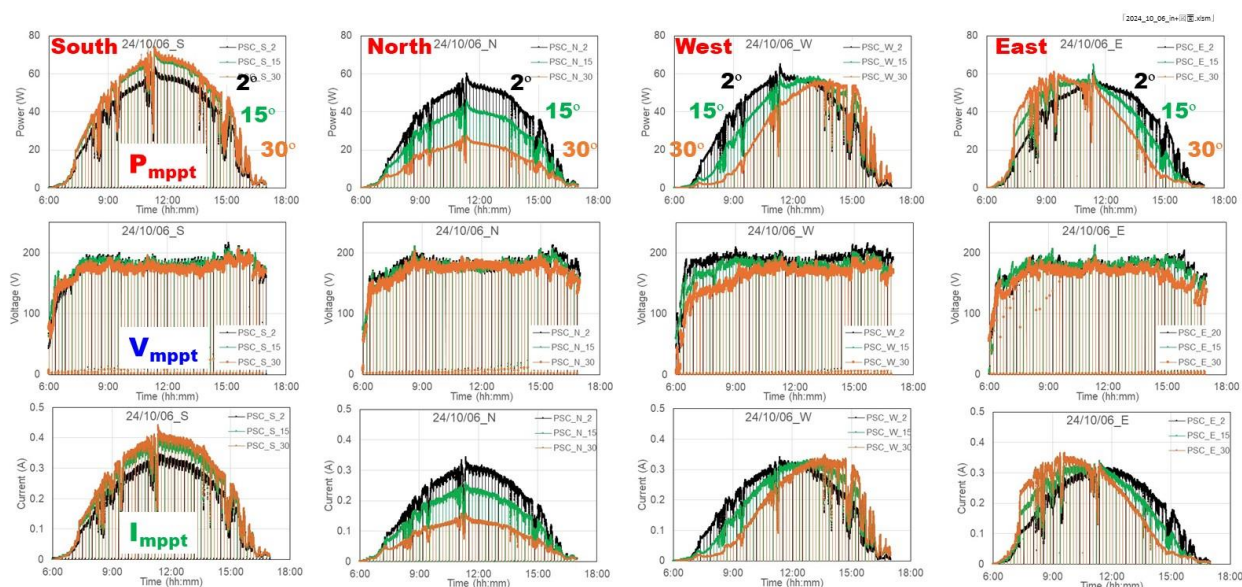


Fig. Outdoor V_{mppt} , I_{mppt} , and P_{mppt} of the PSC modules, which are installed at four azimuth angles (North, South, East and West) and three tilt angles (30°, 15°, 2°). The MPPT of each PSC module was performed by a PC-controlled electronic load.

MAPbI₃/SiGe タンデム太陽電池を指向した Si 基板上 SiGe の組成・製膜プロセス設計

Design of composition and fabrication process of SiGe films on Si substrates toward MAPbI₃/SiGe tandem solar cells

¹名大院工, ²名大未来機構, ³東洋アルミ, ⁴阪大院工, ⁵名大未材研

○(B)八木 健太¹, 勝部 涼司¹, 今井 友貴², 伊藤 耕平¹, 鈴木 紹太³, 南山 偉明³,
ダムリン マルワン^{3,4}, 宇佐美 徳隆^{1,2,5}

¹Grad. Eng., ²InFuS Nagoya Univ., ³Toyo Aluminium K.K., ⁴Osaka Univ., ⁵IMaSS Nagoya Univ.

○Kenta Yagi¹, Ryoji Katsube¹, Yuki Imai², Kohei Ito¹, Shota Suzuki³, Hideaki Minamiyama³,
Marwan Dhamrin^{3,4}, Noritaka Usami^{1,2,5}

E-mail: yagi.kenta.e3@s.mail.nagoya-u.ac.jp

【背景】 タンデム型ペロブスカイト太陽電池では、一般的にハロゲンサイトの混晶化によるバンド構造の調整が行われる。一方、複数のハロゲンを含むハライドペロブスカイトは光や熱等の影響で相分離することが知られており[1]、長期安定性に懸念がある。そこで我々は、ペロブスカイト太陽電池に混晶でない MAPbI₃ を用いることで、安定性と高効率を両立したタンデム太陽電池を構成できないかと考えた。MAPbI₃ 太陽電池に組み合わせるボトムセルの光吸収層としては、当グループで Si 基板上への Al-Ge 合金ペーストの塗布・焼成で構成される簡便な製膜プロセスを開発している SiGe を選択した[2]。本研究では、デバイス特性の計算に基づき SiGe の組成や膜厚を設計し、さらに設計通りの SiGe 層を上記手法で作製可能か実験的に検証することを目的とした。

【計算・実験方法】 トップセルの光吸収層を MAPbI₃ ($E_g = 1.62$ eV) に固定し、Shockley-Queisser limit を基礎とする理論変換効率計算に基づいて SiGe 層の組成を設計した。また、SiGe ボトムセルの膜厚と短絡電流密度の関係を計算することで必要とされる SiGe 層の膜厚を求めた。Si 基板上 Al-Ge 合金の焼成による SiGe/Si 基板の作製は、800, 850, 900 °C で 10 分間の 3 条件で行った。ペースト組成は Al:Ge = 7:3 (mol 比) とし、ペースト厚さは 60 μm とした。熱処理後の各試料に対して表面・断面研磨を施し、SEM-EDS 計測により断面構造と組成分布を評価した。

【結果と考察】 Fig. 1(a) に MAPbI₃/SiGe 太陽電池の理論変換効率の Ge 組成依存性を示す。Ge 組成が 39 mol% で変換効率が最大値をとり、47% 程度であった。Fig. 1(b) に示す短絡電流密度-SiGe 膜厚関係の計算結果によると、理想的な光閉じ込め構造を仮定した場合に短絡電流密度 21 mAcm^{-2} (理論限界値の約 91%) を得るには膜厚 10 μm が必要であり、これ以上の膜厚で均一組成を有する SiGe 層を製膜する必要があることが明らかになった。Fig. 2 には SiGe/Si 基板断面の SEM-EDS 分析の観察結果の一例を示す。Ge 組成は 16 mol% 程度で設計値より小さいが、厚さ方向 20 μm にわたって概ね組成均一な SiGe 層の成長を実証した。つまり、Si 基板上への Al-Ge 合金ペーストの印刷と焼成によって MAPbI₃/SiGe タンデム太陽電池に適した SiGe 層を形成できる可能性が示された。

【謝辞】 本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPN14004)および JST COI-NEXT(No. JPMJPF2204)の支援を受けたものである。

【参考文献】 [1] E.T. Hoke *et al.*, Chem. Sci. **6**, 613 (2015), [2] K. Fukuda *et al.*, Sci. Rep. **12**, 14770 (2022).

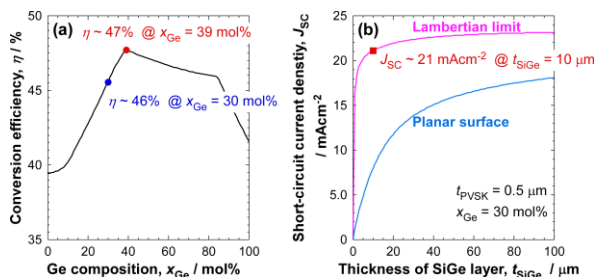


Fig. 1: (a) Relationship between the Ge content and the theoretical efficiency of the MAPbI₃/SiGe tandem solar cells. (b) Thickness dependence of the short-circuit current density of Si_{0.7}Ge_{0.3} single-junction solar cells.

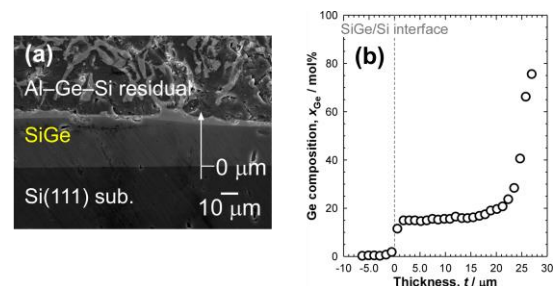


Fig. 2: (a) Cross-sectional SEM image and (b) the corresponding EDS line profile of Ge in the SiGe layer formed by annealing of the Al-Ge/Si sample at 850 °C.

3ハライド型ワイドバンドギャップ ペロブスカイト太陽電池のモフォロジー改善

Morphological Improvement of 3-Halide Wide Bandgap Perovskite Solar Cells

青山学院大学, [○](M1) 杉本 英哉, 高橋 菜々花, 來福 至, 石河 泰明

Aoyama Gakuin Univ., [○]Hideya Sugimoto, Nanaka Takahashi, Itaru Raifuku, Yasuaki Ishikawa

Email: yishikawa@ee.aoyama.ac.jp

1. はじめに

屋内用途に向けた太陽電池では、光吸収層の適切なバンドギャップは屋外用途と異なる。ペロブスカイト化合物(PVK)は組成制御によりバンドギャップ制御が可能であるという特徴から、ペロブスカイト太陽電池は屋内用途においても有望である。一方、ペロブスカイト化合物のワイドバンドギャップ化では、Br 量増加によって相分離が発生する[1]。先行研究においてペロブスカイト構造 ABX_3 の A サイトの Cs 含有量を増やし、X サイトに Cl を用いて Br 含有量を低減させた $Cs_{0.6}FA_{0.3}MA_{0.1}Pb(I_{0.70}Br_{0.25}Cl_{0.05})_3$ の組成にすることでワイドバンドギャップ(1.79 eV)化しつつ、相分離抑制が可能であることを見出している[2]。本研究ではこの組成のペロブスカイト薄膜の成膜条件の検討、およびデバイス化し、その特性の評価を行った。

2. 実験方法

貧溶媒を用いたスピコート法により、 $Cs_{0.6}FA_{0.3}MA_{0.1}Pb(I_{0.70}Br_{0.25}Cl_{0.05})_3$ の組成を有するペロブスカイト薄膜を作製した。溶液濃度 1.6 M、DMF:DMSO=3:7、スピコート条件 1000 rpm/10 s → 2000 rpm/30 s を基準のプロセスとし、それぞれの条件を変化させた際のペロブスカイト薄膜のモフォロジー状態を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて評価した。デバイス構造は glass/ITO/SnO₂/PVK/Spiro-OMeTAD/Au とした。太陽電池特性は 1 sun (AM1.5G, 100 mA/cm²) 条件下および LED 照明下(1000 lx, 0.3056 mW/cm²)において電流-電圧(*J-V*)測定を行うことにより評価した。

3. 実験結果及び考察

基準としたプロセスで成膜したところ、図 1(a)に示すような膜表面に凹凸のある模様が確認された。スピコート条件、溶液濃度、溶媒割合を変化させることで図 1(b)に示すよう

なモフォロジーが改善された膜が得られた。最適化した条件で成膜したペロブスカイト薄膜を光吸収層としたデバイスを作製した。作製したデバイスの *J-V* 曲線を図 2 に示す。低照度下では変換効率 25.8%を記録した。本研究で光吸収材料として用いた 3 ハライドペロブスカイトは相分離の影響を受けにくいいため、低照度向け太陽電池として優れた光吸収層であると示唆される。

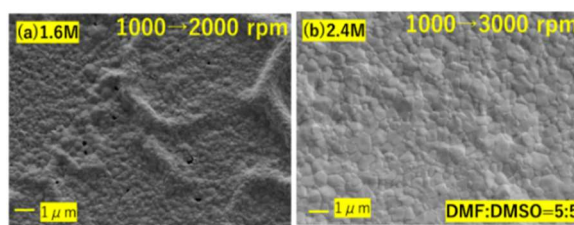


図 1 ペロブスカイト薄膜の表面 SEM 像

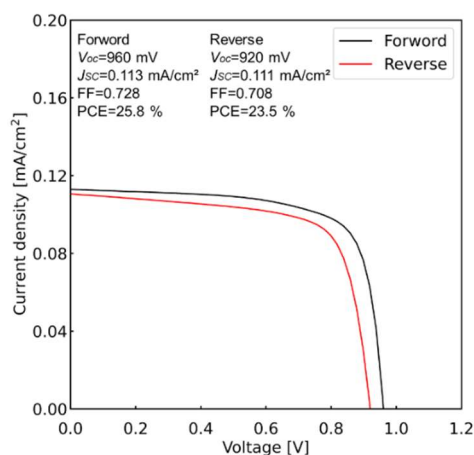


図 2 低照度下(1000 lx, 0.3056 mW/cm²)における 3 ハライドペロブスカイト太陽電池の *J-V* 曲線

[1] S. J. Yoon, *et al.*, *ACS Energy Lett.* 2016, **1**, 290–296.

[2]高橋ら, 第 3 回日本太陽光発電学会学術講演会講演予稿集, p. 57 (2023).



逆構造ワイドギャップペロブスカイト太陽電池の V_{oc} 向上へ向けた電子輸送層の検討

Study on ETLs for V_{oc} improvement of inverted wide-bandgap perovskite solar cells

東大院工¹, 東大院総合², 東大教養³, 東大先端研⁴ ○(MIC) 苅谷 航太¹, 張 叢叢²,

野々村 一輝³, 粟井 文康², 久保 貴哉⁴, 瀬川 浩司^{1,2,3,4}

UTokyo Eng.¹, UTokyo Arts & Sci.², UTokyo KOMEX.³, UTokyo RCAST⁴

○(MIC) Kota Kariya¹, Congcong Zhang², Kazuteru Nonomura³, Fumiyasu Awai², Takaya Kubo⁴,

Hiroshi Segawa^{1,2,3,4}

E-mail : kota-kariya@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

【緒言】ペロブスカイト太陽電池は、組成を変化させることでバンドギャップを容易に調整できることから、他の太陽電池と組み合わせるタンデム太陽電池のサブセルとしても注目されている。しかし、トップセルに用いられるワイドバンドギャップペロブスカイト太陽電池が抱える課題の一つとして、詳細釣り合い原理より得られる理論値 (SQ limit) に対する開放電圧 (V_{oc}) の損失が大きいことが挙げられる。本研究は、逆構造ワイドバンドギャップペロブスカイト太陽電池の電子輸送層のエネルギーレベルを調整することによって、理論値により近い V_{oc} の獲得を目的とした。

【実験方法】本研究で作成したデバイスの構造を Fig. 1. に示した。正孔輸送層には[2-(3,6-ジメトキシ-9H-カルバゾール-9-イル)エチル]ホスホン酸 (MeO-2PACz) を用い、スピコート法により FTO (F:SnO₂) 表面を修飾した。さらに、ホルムアミジニウム(FA)、メチルアンモニウム (MA)、カリウム (K) の3種類のカチオンを含むトリプルカチオン型ペロブスカイト層 (FA_{0.81}MA_{0.14}K_{0.05}PbI_xBr_(3-x)) をアンチソルベント法により成膜した。電子輸送層 (ETL) である ICBA と PCBM はスピコート法により、C₆₀ は真空蒸着法により成膜した。バソクプロイン (BCP) と Ag 電極は真空蒸着法で積層させた。ETL の HOMO レベルは大気中光電子収量分光法により測定し、LUMO レベルは光学ギャップを加算することで見積もった (Fig. 2.)。

【実験結果】ペロブスカイトのバンドギャップを I と Br の比率を変えることで制御し、1.87 eV のワイドバンドギャップペロブスカイトと ICBA を組み合わせることで、1.39 V の V_{oc} が得られた。これはバンドギャップ 1.87 eV における SQ limit の約 90% に相当する。また、ETL の LUMO レベルを浅くすることで、系統的に V_{oc} が大きくなることも確認された (Fig. 3.)。

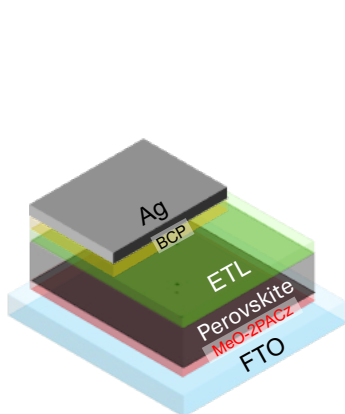


Fig. 1. Schematic illustration of devices

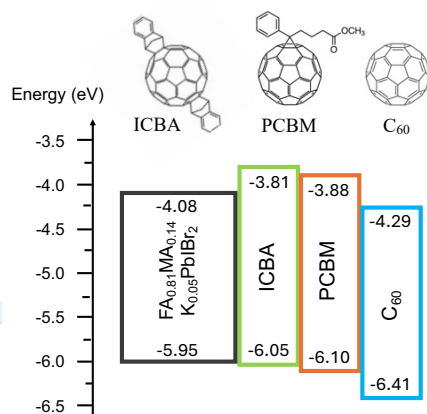


Fig. 2. Molecular structures and Energy levels of ICBA, PCBM, C₆₀, and Perovskite

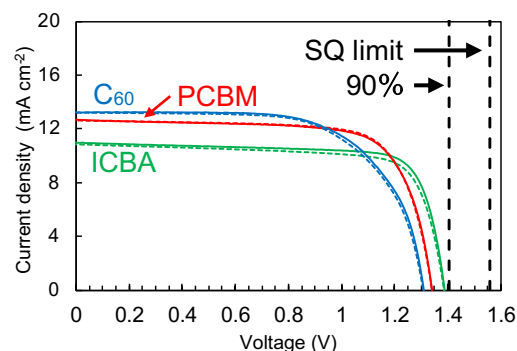


Fig. 3. J-V Curves of devices with ICBA, PCBM, and C₆₀

タンデムトップセルへ向けたペロブスカイト太陽電池の バンドギャップおよび膜厚検討

Study on band gap and film thickness of perovskite solar cells for tandem top cells

東大院総合¹, 東大先端研² ○粟井 文康¹, 多田 圭志¹, 久保 貴哉², 瀬川 浩司^{1,2}

UTokyo Arts & Sci.¹, UTokyo RCAST²

○Fumiyasu Awai¹, Keishi Tada¹, Takaya Kubo², Hiroshi Segawa^{1,2}

E-mail: awai@dsc.rcast.u-tokyo.ac.jp

【緒言】 ペロブスカイト太陽電池は、シリコン太陽電池に匹敵する高い変換効率を示しながらも軽量であることなどから、次世代太陽電池の一つとして注目を集めている。また、バンドギャップ (E_g) の制御が容易であるため、タンデム太陽電池のサブセルとしての活用も期待されている。タンデムのトップセルとして利用する場合、透過した光はボトムセルにて吸収して利用できるため、単セルの場合とは異なるセル設計が求められる。本研究では、タンデムトップセルとしての活用へ向けた、ペロブスカイト太陽電池の E_g と膜厚の検討を行った。

【実験】 光学シミュレーションは、e-ARC*を用いて行った。ペロブスカイト太陽電池は、電子輸送層に酸化チタン (TiO_2)、正孔輸送層に Spiro-OMeTAD を用いた順構造型にて検討を行った。ペロブスカイトには、ホルムアミジニウム (FA)、メチルアンモニウム (MA)、カリウム (K) の3種類のカチオンを含んだトリプルカチオン型 ($\text{FA}_{0.81}\text{MA}_{0.14}\text{K}_{0.05}\text{PbI}_x\text{Br}_{3-x}$) を用い、ヨウ素 (I) と臭素 (Br) の比率 (x) を変えて E_g を制御した。*A. Nakane, et al., *J. Appl. Phys.* **120** (2016) 064505.

【結果】 ペロブスカイトの E_g に対する短絡電流密度 (J_{sc}) および開放電圧 (V_{oc}) の値を Fig. 1. に示した。 E_g に伴って J_{sc} は理論通りに変化しているが、 V_{oc} は理論値 (SQ limit) との乖離が大きく、 E_g を広げるメリットを十分活かしていない。一方で、ペロブスカイトの光吸収の多くは表面付近で行われており (Fig. 2.)、タンデムトップセルとして用いる場合は、膜厚を薄くして長波長領域の光を透過させながら電荷分離効率を高める手法も有効なアプローチとなり得る。実際に膜厚を薄くしながらセル特性を評価したところ、透過光を増やして J_{sc} を調整しながら、 V_{oc} および FF が向上する結果が得られた (Fig. 3.)。

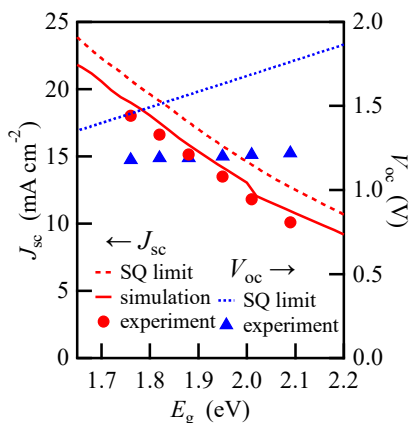


Fig. 1. E_g dependance of J_{sc} and V_{oc}

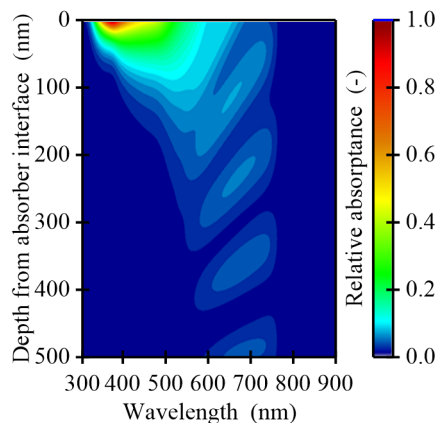


Fig. 2. Relative absorbance depending on depth

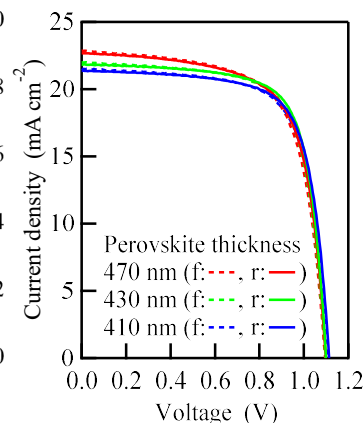


Fig. 3. J - V curves of devices with different thickness