

Symposium (Oral) Symposium : Perovskite, Compounds, and Silicon: Current Status and Future Prospects of Tandem Solar Cells
--

📅 Sun. Sep 7, 2025 1:00 PM - 4:15 PM JST | Sun. Sep 7, 2025 4:00 AM - 7:15 AM UTC | 🏢 S102 (Lecture Hall South)

[7p-S102-1~6] Perovskite, Compounds, and Silicon: Current Status and Future Prospects of Tandem Solar Cells

Yoshitaro Nose(Kyoto Univ.), Mitsuru Imaizumi(Sanjo City Univ.)

1:00 PM - 1:30 PM JST | 4:00 AM - 4:30 AM UTC

[7p-S102-1] Development of Ultralight Perovskite/Chalcopyrite Tandem Solar Panels

○Hiroki Sugimoto¹, Motoshi Nakamura¹, Ching Chang Lin¹ (1.PXP Corporation)

1:30 PM - 2:00 PM JST | 4:30 AM - 5:00 AM UTC

[7p-S102-2] Cu₂O/Si Tandem Solar cells

○Soichiro Shibasaki¹, Takashi Yamamoto¹, Sara Yoshio¹, Kanta Sugimoto¹, Atsushi Wada¹, Yuya Honishi¹, Naoyuki Nakagawa¹, Yukitami Mizuno¹, Motohiro Toyota¹, Junji Sano¹, Yasutaka Nishida¹, Kazushige Yamamoto¹ (1.Toshiba Corporation)

2:00 PM - 2:30 PM JST | 5:00 AM - 5:30 AM UTC

[7p-S102-3] III-V Thin-Film Multijunction Solar Cells

○Tatsuya Takamoto¹ (1.Univ. of Miyazaki)

2:45 PM - 3:15 PM JST | 5:45 AM - 6:15 AM UTC

[7p-S102-4] Development of Heterogeneous Tandem Solar Cells using Smart Stack

○Kikuo Makita¹ (1.AIST)

3:15 PM - 3:45 PM JST | 6:15 AM - 6:45 AM UTC

[7p-S102-5] Highly Efficient All-Perovskite Tandem Solar Cells Realized by Unique Surface Treatment Methods (Dipole Strategy)

○Atsushi Wakamiya¹ (1.ICR, Kyoto Univ.)

3:45 PM - 4:15 PM JST | 6:45 AM - 7:15 AM UTC

[7p-S102-6] Characterization Procedures of Perovskite Tandem Solar Cells

○Hiromi Tobita¹ (1.Japan Electrical Safety & Environment Technology Laboratories)

ペロブスカイト/カルコパイライト軽量タンデム太陽電池の開発

Development of Ultralight Perovskite/Chalcopyrite Tandem Solar Panels

株式会社 PXP, [○]杉本 広紀, 中村 元志, 林 京璋

PXP Corporation, [○]Hiroki Sugimoto, Motoshi Nakamura, Ching Chang Lin

E-mail: Hiroki.Sugimoto@pxpco.jp

従来型の太陽電池の設置できない新領域において軽量型太陽電池のニーズが高まっており、国内外の様々なタイプの軽量型太陽電池が国内新領域市場に投入されつつある。そのような中で、高い変換効率を持つタンデム型は、将来高いコスト競争力を持つソリューションと期待されており、ペロブスカイト/シリコン型や、ペロブスカイト/ペロブスカイト型、ペロブスカイト/カルコパイライト型がしのぎを削っている。中でもペロブスカイト/カルコパイライト型は世界でも開発人口が少なく、他の太陽電池よりも開発が遅れているが、研究開発の余地が大きい太陽電池となっている。特に、タンデム型でありながら、軽量で曲げることができ、割れずに、燃えにくい特徴を持つ点は、新領域市場にとってアドバンテージとなると考えられ、また、ペロブスカイト、カルコパイライト共に国産の原材料を用いる事ができることから、国産軽量タンデム太陽電池を実現し得る数少ない選択肢として期待されている。実用化に向けた課題は変換効率の改善に加え、耐久性の改善、大面積化、量産技術の開発と多岐に渡るが、本発表では PXP における最新の開発状況と今後の展望について報告する。

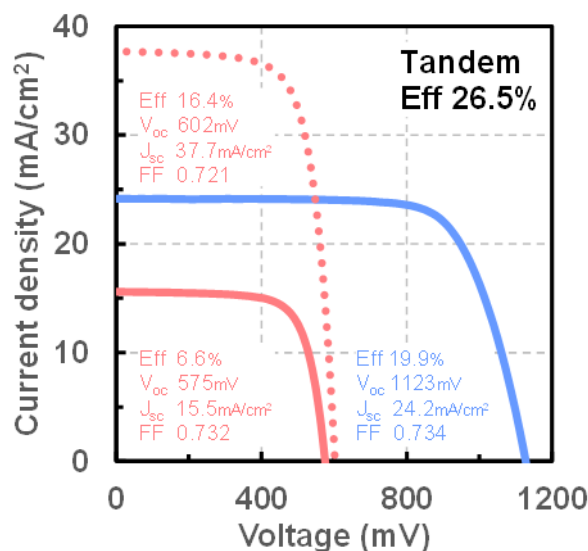


Figure 1: Current-voltage characteristics of 4 terminal perovskite/chalcopyrite tandem solar cell.

(Blue : Perovskite top cell, Red : Chalcopyrite bottom cell, Dashed : Non-filtered chalcopyrite cell)

Cu₂O/Si タンデム型太陽電池

Cu₂O/Si Tandem Solar cells

株式会社 東芝 総合研究所 ○芝崎 聡一郎, 山本 孝, 吉尾 紗良, 杉本 寛太, 和田 淳,
保西 祐弥, 中川 直之, 水野 幸民, 豊田 基博, 佐野 準治, 西田 靖孝, 山本 和重
Toshiba Corp. Corporate Laboratory, °Soichiro Shibasaki, Takashi Yamamoto, Sara Yoshio, Kanta
Sugimoto, Atsushi Wada, Yuya Honishi, Naoyuki Nakagawa, Yukitami Mizuno, Motohiro Toyota,
Junji Sano, Yasutaka Nishida, Kazushige Yamamoto
E-mail: soichiro.shibasaki@toshiba.co.jp

限られた設置面積で高出力を必要とする電気自動車などの電動モビリティ向けに、30%以上の高効率と高信頼性を兼ね備えた4端子Cu₂O/Siタンデム太陽電池を開発している。Cu₂Oは、地球上に豊富に存在する銅と酸素で構成され、環境・資源リスクが低く、酸化物であるため高い耐久性が期待される。更にCu₂Oはワイドバンドギャップ($E_g \sim 2.17$ eV)材料で高い透明性を持ち、Siボトムセル($E_g \sim 1.1$ eV)を高効率に発電させることができる。小型Cu₂Oセル($3 \times 10 \text{ mm}^2$)で、10.5%[1]の効率を報告しており、その技術を実用化サイズ($125 \times 42 \text{ mm}^2$)に転用するとともに、セル間抵抗に起因する直列抵抗増大による形状因子低下などの課題にも取り組むことで、効率9.3%を実証した。更にトップセルを125mm角のSiボトムセル上に配置し、Cu₂O/Siタンデム太陽電池として効率26.1%を実証[2]したが、目標とするタンデム効率30%には、まだ改善が必要である。以下に、Cu₂Oトップセル、Siボトムセルの取り組み中の効率改善方針を示す。

Cu₂Oトップセル効率については、最大理論効率20%の半分以下の9.3%であり、改善の余地が大きい。効率低下要因の1つに、デバイスシミュレーションによりCu₂O表層のp⁺層の存在が挙げられる[3]。このp⁺層形成の要因を解明するため、第一原理計算によるCu₂O表層の電子状態の解析を行い、主要な結晶欠陥はアクセプタとなるCu空孔であること、Cu空孔は成膜プロセスにより発生濃度や分布形状が変化して、Cu₂O表層に高密度な欠陥層が形成され得ることを見出した。この結果に基づき、Cu₂O表層の改善手法の開発及びトップセルの効率改善に取り組んでいる。Siボトムセル効率については、光学シミュレーションによりCu₂Oトップセルの透過率スペクトルを最適化する層構成を設計し、実測で16.8%を確認している。これは用いたSiボトムセルの最大理論効率(17.5%)に迫る値であり、光学設計の観点のみでは効率改善が困難である。今回のSiセルは赤外域の量子効率が低く、更なる改善には赤外域を効率よく発電できるSiセルが必要であり、新規セルに適した光学設計を進めている。これらを組合わせて効率30%の実現を目指している。

本成果は、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)との共同研究事業の結果として得られたものです。

[1] 芝崎聡一郎ら、第71回応用物理学会春季学術講演会 25p-22C-1 (2024).

[2] 山本孝、NEDO 再生可能エネルギー分野成果報告会 2025 (submitted).

[3] 杉本寛太ら、第69回応用物理学会春季学術講演会 23p-E106-7 (2022).

III-V 族薄膜多接合型太陽電池

III-V Thin-Film Multijunction Solar Cells

宮崎大学¹, °高本 達也¹

Univ. of Miyazaki¹, °Tatsuya Takamoto

E-mail: takamoto.tatsuya@cc.miyazaki-u.ac.jp

III-V 族薄膜多接合型太陽電池とは、GaInAsP 材料などの III-V 化合物半導体で、異なるバンドギャップを有する複数の太陽電池がトンネル接合により接続された多接合型で、GaAs や Ge などの単結晶基板上にエピタキシャル成長された単結晶薄膜の太陽電池層を、金属フィルムや樹脂フィルムなどで支持して単結晶基板より分離させた薄膜単結晶太陽電池のことであり、以下のような特徴を有する。

- 高品質な単結晶であるため高い長期信頼性を有する。(宇宙環境での使用実績)
- 多接合型であるため高い変換効率を有する。(3 接合型では AM1.5G 基準光下 37.9%)
- 数 μm の薄膜がフィルムで支持された構造で軽量フレキシブルである。

太陽電池の課題である更なる高効率化については、接合数の増加で可能となり、低コスト化については、太陽電池層のさらなる薄膜化や基板材料の再利用もしくは再生により将来可能となる。

現在、実用化されている III-V 族薄膜多接合型太陽電池は、IMM3J (Inverted Metamorphic Triple-junction) と呼ばれる InGaP トップセル/GaAs ミドルセル/InGaAs ボトムセルからなる 3 接合型太陽電池である。国内では小型月着陸実証機 SLIM を始めとして、国内の人工衛星に搭載されている。また、海外では Zephyr を始めとした成層圏無人飛行機用に軽量フレキシブル太陽電池が搭載されている。本講演では IMM3J 太陽電池およびその応用先についてレビューし、将来の III-V 族薄膜多接合型太陽電池の技術開発の方向性について述べる。

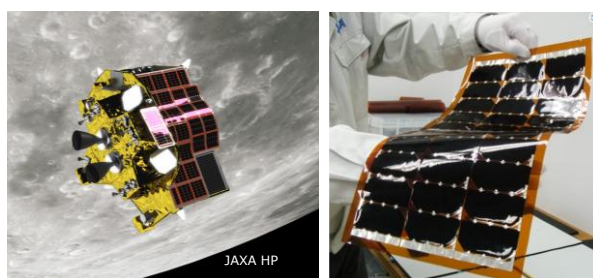


図1 小型月着陸実証機 SLIM および搭載された IMM3J 太陽電池シート (総出力 540W) ^{*1}

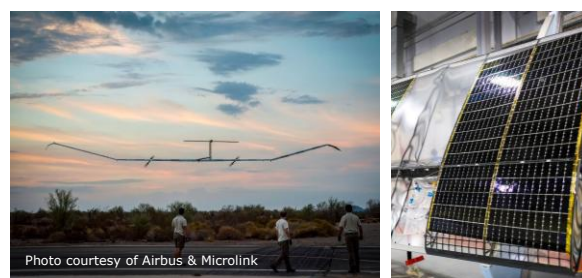


図2 成層圏無人飛行機 Zephyr および搭載された IMM3J 太陽電池シート (総出力 3.0kW) ^{*2}

*1: <https://corporate.jp.sharp/news/240129-b.html>

*2: <https://www.airforce-technology.com/news/microlink-solar-sheets-zephyr-s-uav/>

スマートスタックによる異種材料タンデム型太陽電池の開発

Development of Heterogeneous Tandem Solar Cells using Smart Stack

産総研, °牧田 紀久夫

AIST, °Kikuo Makita,

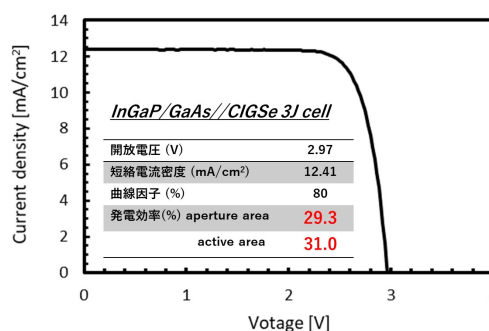
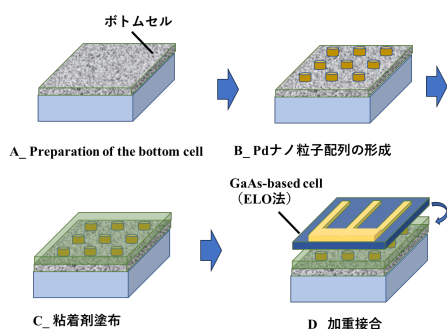
E-mail: kikuo-makita@aist.go.jp

タンデム型太陽電池は、波長感度の異なる複数セルを直列にスタックすることにより高効率を得られる。その製法としては、結晶成長技術による一貫形成（モノリシック型）、接合技術による形成（メカニカルスタック型）などがある。このような背景において、当グループではパラジウム（Pd）ナノ粒子を接合界面に介在したスマートスタック技術（Smart stack）[1]の開発を行ってきた。本技術は、ナノメートルオーダーの Pd ナノ粒子を接合面に自己配列で形成し、適切な加重圧力のもと構成セルを接合するものである。このため、接合界面では接合抵抗および光損失の低減が図られ、タンデム太陽電池として有用な製法である。これまで、GaAs//InP タンデム構造において効率 34.9%を達成、また異種材料からなるタンデム型太陽電池として GaAs//Si[2]あるいは GaAs//CuInGaSe₂ (以下 CIGSe と表記)[3]などを実証してきた。

本報告では、特に高効率/放射線耐性等により次世代宇宙用太陽電池として期待されている GaAs//CIGSe タンデム太陽電池を事例として、Smart stack の進展について述べる。CIGSe セルでは、粒界結晶に起因した表面ラフネス（～100nm）が存在するため、接合上課題となる。我々は、Smart stack の進化形態として、接合界面にシリコーン系の希釈粘着剤と Pd ナノ粒子を介在させた接合技術（Modified smart stack）を開発し、接合品質と接合強度の両立に成功した。これより、GaAs//CIGSe 3 接合セルとして世界最高の発電効率 29.3%を実証した[3]。講演では、実用化の上で重要となる大面積化技術の進展についても述べる。

【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「移動体用太陽電池の研究開発（超高効率モジュール技術開発/低コストエビ・接合技術開発）」の委託の下で行われた。

【文献】[1] H. Mizuno, et al, *Appl. Phys. Lett.*, 101, 191111 (2012). [2] K. Makita, et al, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, 28, 16 (2020). [3] K. Makita, et al, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, 31, 71 (2023).



Modified smart stack の製法と GaAs//CIGSe 3 接合セルの特性（効率 29.3%） [3]

独自の界面構造修飾（双極子戦略）による オールペロブスカイトタンデム型太陽電池の高性能化

Efficient All-Perovskite Tandem Solar Cells Realized by Unique Surface Treatment Methods (Dipole Strategy)

京大化研¹ °若宮 淳志¹

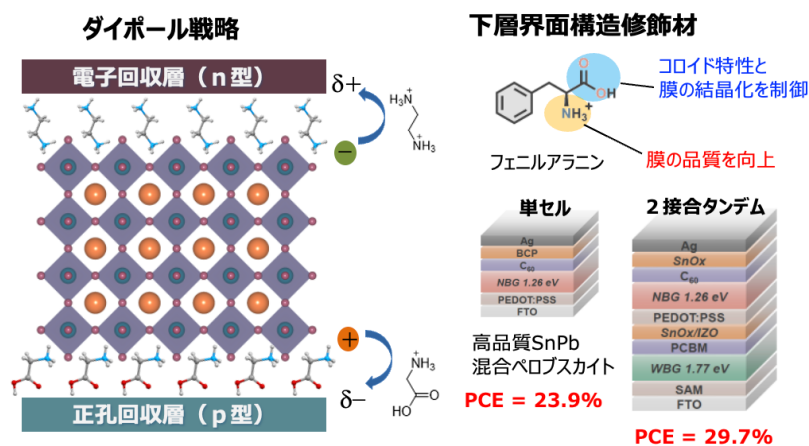
ICR, Kyoto Univ.¹, °Atsushi Wakamiya¹

E-mail: wakamiya@scl.kyoto-u.ac.jp

ABX₃型の金属ハライドペロブスカイト半導体は塗って作製でき、そのバンドギャップ（光電変換領域）は、前駆体溶液に用いる各イオンの組成により比較的容易に制御できる。この特徴を活かし手して、異なるバンドギャップをもつ複数のペロブスカイト層を組み合わせたオールペロブスカイトのタンデム型が高性能な次々世代の太陽電池として注目されている。タンデム型太陽電池の高効率化にも、まずは、組み合わせる各太陽電池セルの光電変換特性の向上が重要となる。

我々は、ペロブスカイト層の上下表面に、各電荷の取り出しに有利な双極子をもたせる「双極子戦略」を提唱し、独自の界面構造修飾法を開発してきた（図）¹⁻⁷。これによりバンドギャップからの電圧ロスを低減でき、ペロブスカイト太陽電池の開放電圧が最大化できる¹。本手法は、高い一般性を持ち、トップセルからボトムセルまで、様々なバンドギャップをもつペロブスカイト層に対しても顕著な高電圧化効果が得られることを見出している²。この独自手法を用いて、2~4

接合型までのオールペロブスカイトタンデム型セルを作製した。2接合タンデムセルでは、29.7%（認証値 29.26%）、1 cm²サイズの3接合型でも28.4%（認証値 27.28%）の光電変換効率を達成した（図）⁷。本発表では、界面修飾材料の分子設計の考え方を中心に、最新の我々の成果について紹介する。



References

- 1) S. Hu, R. Murdey, A. Wakamiya, et al. *Energy Environ. Sci.* **2022**, 15, 2096.
- 2) S. Hu, J. Pascual, A. Wakamiya, et al. *ACS Appl. Interfaces* **2022**, 14, 56290.
- 3) S. Hu, H. J. Snaith, A. Wakamiya, et al. *Adv. Mater.* **2023**, 35, 2208320.
- 4) S. Hu, J. A. Smith, H. J. Snaith, *Precis. Chem.* **2023**, 1, 69.
- 5) T. Nakamura, A. Wakamiya, et al. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2024**, 97, uoad025.
- 6) S. Hu, A. Wakamiya, H. J. Snaith, et al. *Chem. Rev.* **2024**, 124, 4079.
- 7) S. Hu, M. A. Truong, A. Wakamiya, H. J. Snaith, et al. *Nature* **2025**, 639, 93.

タンデム型ペロブスカイト太陽電池の評価技術

Characterization Procedures of Perovskite Tandem Solar Cells

電気安全環境研究所 ○飛田博美

JET, °Hiromi Tobita

E-mail: tobita@jet.or.jp

太陽電池の電気的な特性を知るために基準状態(AM1.5G, 1000W/m², 25°C)における変換効率を評価することは重要である。JET は 2017 年に Progress in photovoltaics に掲載の Solar cell efficiency tables の登録機関として認定された。また、2020 年にはオールペロブスカイト太陽電池の測定結果が世界で初めて Solar cell efficiency tables ver.56¹⁾に掲載された。タンデム型太陽電池の評価方法は単接合太陽電池やシリコン系の太陽電池の評価より工程が多く、正しい性能を評価するために太陽電池の種類に合った要素技術の開発が行われてきた。ペロブスカイト太陽電池の IV 特性はヒステリシスが現れることが知られており、定常状態の出力を確認するために mppt や電圧一定の条件によって長時間かけた測定をすることもある。本発表では、タンデム型ペロブスカイト太陽電池の変換効率を決定するまでの評価手法と国内で一般的に使われている設備に適用できるような内容を含めて紹介したい。

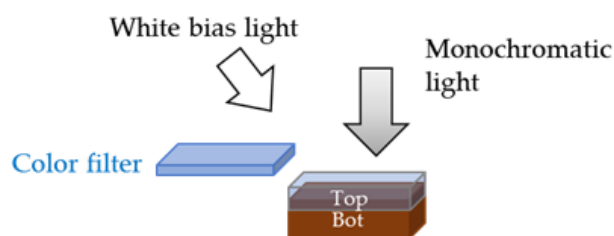


Fig1. EQE measurement conditions

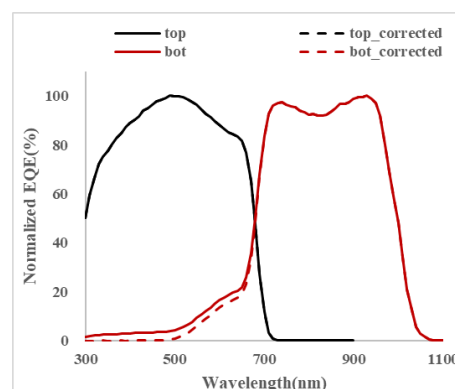


Fig2. Example of corrected EQE

1) M.A. Green et al., Solar cell efficiency tables (version 56), Progress in Photovoltaics: Research and Applications 28 7 (2020) 627-735.