

高効率・高耐久性全ペロブスカイト 3 接合太陽電池モジュール： 電圧整合 vs. 電流整合

Highly efficient and durable all-perovskite triple-junction solar modules:
voltage matching vs. current matching

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)太陽電池の多接合化は、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化、更に量産性の観点からは、モノリシック直列接続構造をもつ全 PVK 多接合モジュールが望まれる。しかし、何れにしても PVK セル、特にワイドバンドギャップトップセルの耐久性は十分ではない。そこで、高い変換効率の観点に加えて、トップセルの劣化の影響を最小限に抑える観点から、3 接合モジュールの構成を設計、選定した[1]。

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、電流密度－電圧 ($j[v]$) 特性を

$$j[v] = j_{ph} - j_1 \exp\left[\frac{q(v + r_s j[v])}{(k_B T_{cell})}\right] - j_2 \exp\left[\frac{q(v + r_s j[v])}{(2k_B T_{cell})}\right]$$

により表した。これを用いて、図 1 に示される 3 種類のモジュールの変換効率を計算し、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。トップセルの光電流密度 (j_{ph})、SRH 再結合電流密度の比例係数 (j_2)、及び直列抵抗 (r_s) が劣化により変化したときのモジュール効率への影響を調べた。

2T モジュールを用いて高い変換効率を得るためには、電流整合の要請により I, Br 混合アニオン組成であるバンドギャップ 2.15–2.2 eV のトップセルの使用が必須である。しかし現状では、この組成は I リッチ相と Br リッチ相に分離しやすいため、高い耐久性は望めない[2]。一方、SPVM, SSCM の場合は、セル幅の調節によりバンドギャップ 2.3 eV の CsPbBr₃ を用いることができるので、相分離の問題が回避される。

両者に用いられるトップセルの j_{ph} , j_2 , r_s がそれぞれ単独で変化し、トップセルの変換効率が初期値の 80% (相対値) となったときのモジュール効率を求めた結果が図 2 である。初期の両者の効率は同等である。劣化により j_{ph} が低下すると、SSCM の場合はミドル-ボトムモジュールの電流密度も小さくなるのでモジュール効率が著しく低下するのに対し、SPVM の効率低下はトップモジュール効率の低下分のみに抑えられる。逆に j_2 が増大するとセルの最大出力電圧が小さくなるので、SPVM への影響がより大きい。一方 r_s が増大しても、SPVM, SSCM のどちらもモジュール効率の低下は小さい。従って、トップセルの劣化要因によってモジュールの構成を使い分ければ、モジュール効率の低下が最小限に抑えられる。

[1] Y. Takeda, et al., Prog. Photovolt.: Res. Appl., doi: 10.1002/pip.3786 (2024).

[2] L. P. Duan, et al., Nat. Rev. Mater. **8**, 261 (2023).

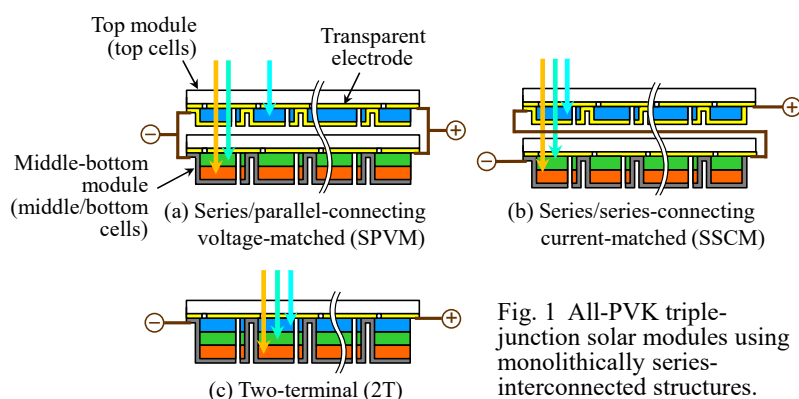


Fig. 1 All-PVK triple-junction solar modules using monolithically series-interconnected structures.

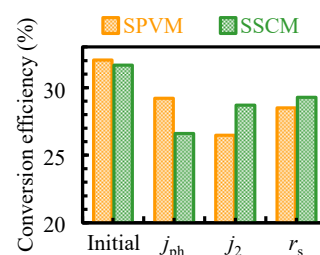


Fig. 2 Initial conversion efficiencies of SPVM and SSCM modules and efficiencies when the top cells degraded owing to j_{ph} decrease, j_2 increase, and r_s increase, respectively.