

錫系ペロブスカイト太陽電池とそれを用いたペロブスカイトタンデム太陽電池の研究開発動向

(電気通信大学・i-PERC) 早瀬修二

Frontier of research and development of Tin-based perovskite solar cells and their application to perovskite tandem solar cells

(i-PERC, The University of Electrocommunications) Shuzi Hayase

Since the bandgap of Tin-based perovskite (Lead-free tin perovskite (Sn-PVK) and Tin-Lead alloyed perovskite (SnPb-PVK)) are between 1.2 eV and 1.4 eV, they have potentials theoretically to be high efficiency-single junction solar cells from the viewpoint of SQ limit. The efficiency of the SnPb-PVK-PV was enhanced to 23-24% which is close to that of Pb-PVK-PV (25-25%). The efficiency of the Sn-PVK-PV is still 14-15% because of the short carrier lifetime which is brought about by the lattice defects such as ion vacancy, antisite, interstitial, and Sn^{4+} . Some of the approaches to overcome these problems are reviewed. The stability of these perovskite solar cells is also discussed. Since the SnPb-PVK-PV has narrower bandgap of around 1.25 eV, these cells are considered as the bottom cells of the all-perovskite tandem cells giving flexible tandem solar cells. The efficiency over 29% (as of the end of 2023) is reported. To enhance the efficiency, the top-cell efficiency, bottom-cell efficiency and interconnection layer has to be well-designed. The recent progress on these all-perovskite tandems is reviewed.

Keywords : Tin perovskite, Tin-Lead perovskite, Sn-PVK, SnPb-perovskite, tandem solar cell

ハロゲン化鉛ペロブスカイト太陽電池 (Pb-PVK-PV) の効率は PIN (逆構造)、NIP (順構造) とともに約 26% に達している (2023 年末時点)。一方、錫は鉛と同じ 14 族に属し、欠陥がない錫ペロブスカイト太陽電池の効率は理論的には鉛ペロブスカイト太陽電池と類似した性能が期待できる。錫系ペロブスカイト太陽電池

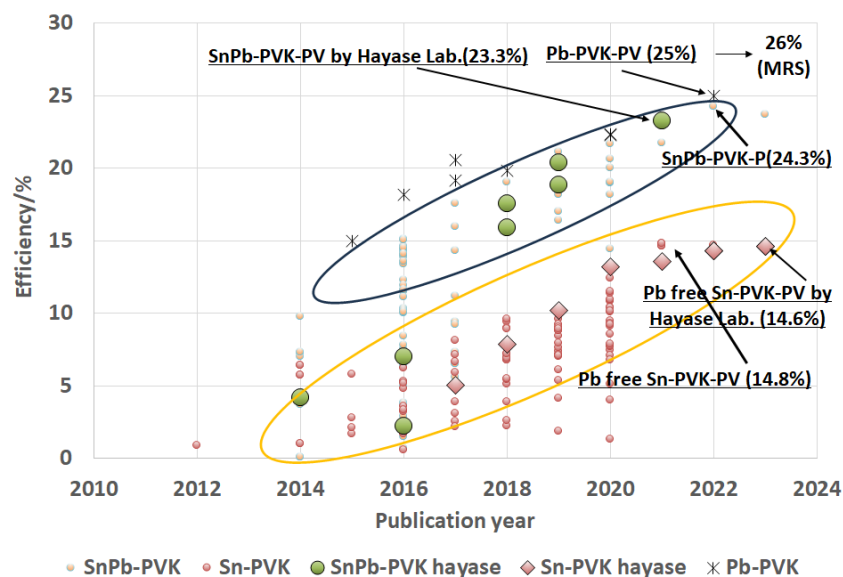


図1 鉛ペロブスカイト、錫ペロブスカイト、錫鉛ペロブスカイト太陽電池 (PIN 逆構造に限定) 効率の推移

池（鉛フリー錫ペロブスカイト太陽電池、錫鉛ペロブスカイト）の効率の推移を逆構造 Pb-PVK-PV を含めて図 1 にまとめて示す。SnPb-PVK-PV の効率は 23-24% に向上しており、逆構造の Pb-PVK-PV の効率に近づいている。一方、Pb-free Sn-PV-PVK の効率も年度ごとに向上し 14-15% に達している。どちらも Sn^{4+} 不純物の低減、

HTL/PVK, PVK/ETL ヘテロ界面の欠陥を種々のパッシベーションにより低減し効率の向上を図ってきた。我々の例を含めそのアプローチのいくつかを述べる¹⁾。また逆構造の錫系ペロブスカイト太陽電池が順構造よりも高い効率を示す理由についても議論する²⁾。SnPb-PVK-PV の耐久性がいくつかの論文で議論されており、85℃の耐久性試験に耐える太陽電池構成が報告されている。

一方、SQ limit を超える高効率太陽電池を目指してペロブスカイトタンデム太陽電池（図 2）の研究が盛んである。トップセルは 1.6-1.8eV のバンドギャップを有する Pb-PVK-PV で可視光領域を光電変換する。ボトムセルはバンドギャップが 1.1-1.3eV の太陽電池で Si 太陽電池、CIGS 太陽電池、SnPb-PVK-PV 等が検討されている。トップセル、ボトムセルの効率向上と電流整合、interconnecting layer など各層の設計が重要である。Pb-PVK-PV/Si-PV タンデム太陽電池の効率が最も高く 33.9%、Pb-PVK-PV/SnPb-PVK-PV（全ペロブスカイトタンデム太陽電池）の効率は 29% に達している³⁾。我々は 26-27% の効率を報告している⁴⁾。Interconnecting layer の設計指針、耐久性の観点から問題視されているトップ層の光照射層分離等を含め、ペロブスカイトタンデム太陽電池の問題点とその解決策をレビューする。

- 1) "Bottom Hole Extraction Layer and Top In-situ Protection Layer Yields over 14% Efficiency in Sn-based Perovskite Solar Cells" Wang Lian, Shuzi Hayase, et al., *ACS Energy Lett.*, **2022**, 7, 3703-3708.
- 2) "Sn perovskite solar cells with tin oxide nanoparticle layer as hole transport layer", Takeshi Kitamura, Shuzi Hayase, et al., *ACS Energy Lett.*, **2023**, 8, 3565-3568.
- 3) Martin Green, et al., *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **2023**, 31, 651-663, Efficiency Table 62.
- 4) "All Perovskite Tandem Solar Cells Approach 26.5% Efficiency by Employing Wide Bandgap Lead Perovskite Solar Cells with New Mono-molecular HTL Layer" Bi, Huan; Segawa Hiroshi, Hayase, Shuzi, et al, *ACS Energy Lett.*, **2023**, 8, 3852-3859.

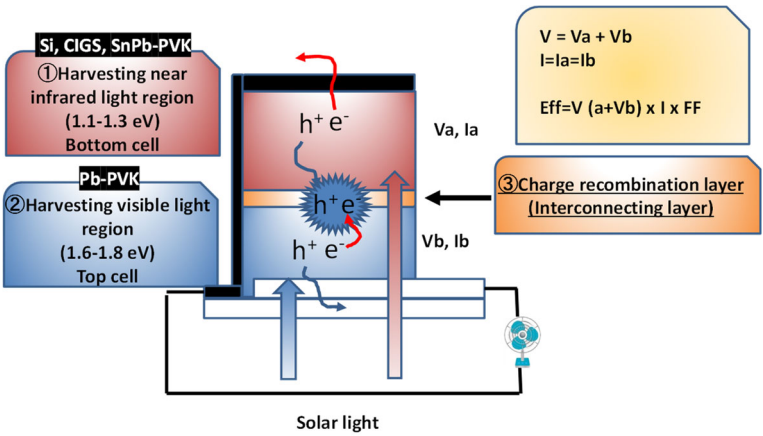


図 2 ペロブスカイトタンデム太陽電池の構造

表 1 ペロブスカイトタンデム太陽電池の効率

Tandem	Efficiency	Area	Institute
	%	cm ²	
Pb PVK(top)/Si(Bottom)	** 33.7	1.004	KAUST
Pb-PVK/CIGS	24.2	1.045	HZB
Pb-PVK/SnPb-PVK	* 28.2	1.038	Nanjing Univ.
Si(single) PV	26.8	274.4	Longi
Pb PVK PV	26.0	0.075	IoS/CAS

*29.1%, 0.049 cm² **33.9% 1 cm² (Longi)