

CsSnGeI₃/FASnI₃双吸收层 无铅钙钛矿太阳能电池 性能研究

丁熙娅^{1*}, 陈卓颜¹, 陈金耀¹, 王希¹, 张馨¹, 刘邦震¹, 王传坤^{1,2#}

¹兴义民族师范学院物理与工程技术学院, 贵州 兴义

²黔东南州微纳功能材料重点实验室, 贵州 兴义

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

基于SCAPS-1D软件构建CsSnGeI₃/FASnI₃双吸收层无铅钙钛矿太阳能电池并进行数值模拟研究。研究表明双吸收层结构可有效拓宽光谱响应范围, 提升器件性能, 双吸收层器件光电转换效率(PCE)为26.26%, 优于单吸收层器件(19.95%)。通过优化CsSnGeI₃和FASnI₃吸收层厚度, FASnI₃/CsSnGeI₃界面缺陷态密度TiO₂电子传输层厚度Cu₂O空穴传输层厚度等参数对提升高效无铅钙钛矿太阳能电池的结构设计与性能优化提供了理论指导。

关键词

无铅钙钛矿太阳能电池, 双吸收层, SCAPS-1D, 界面缺陷

Performance Study of Lead-Free Perovskite Solar Cells with CsSnGeI₃/FASnI₃ Dual Absorption Layers

Xiya Ding^{1*}, Zhuoyan Chen¹, Jinyao Chen¹, Xi Wang¹, Xin Zhang¹, Bangzhen Liu¹,
Chuankun Wang^{1,2#}

¹College of Physics and Engineering Technology, Minzu Normal University of Xingyi, Xingyi Guizhou

²Key Laboratory for Micro-Nano Functional Materials of Qianxinan, Xingyi Guizhou

Received: April 25, 2026; accepted: May 17, 2026; published: May 29, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 丁熙娅, 陈卓颜, 陈金耀, 王希, 张馨, 刘邦震, 王传坤. CsSnGeI₃/FASnI₃双吸收层无铅钙钛矿太阳能电池性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 257-265. DOI: 10.12677/ms.2026.165119

Abstract

Lead-free perovskite solar cells (PSCs) with a dual-absorption layer incorporating CsSnGeI₃/FASnI₃ were produced and evaluated using SCAPS-1D software. The research illustrates that the dual-absorption layer configuration notably widens the spectral response range and boosts device efficiency. The power conversion efficiency (PCE) of the dual-absorption layer device achieves 26.26%, outperforming the single-absorption layer device (19.95%). Fine-tuning the thickness of CsSnGeI₃ and FASnI₃ layers, the defect state density at the FASnI₃/CsSnGeI₃ interface, as well as the thickness of the TiO₂ electron transport layer and the Cu₂O hole transport layer, provides valuable insights for improving the structural design and performance of high-efficiency lead-free PSCs.

Keywords

Lead-Free Perovskite Solar Cells, Dual-Absorption Layer, SCAPS-1D, Interface Defects

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钙钛矿太阳能电池(PSCs)是基于有机-无机杂化钙钛矿材料作为光吸收层的光伏器件。钙钛矿材料其具有吸收系数高、载流子迁移率高、带隙可调、低激子结合能、成本较低等[1]-[5]特点,使得钙钛矿太阳能电池的 PCE 已经突破 26%。随着钙钛矿在材料设计、器件优化和稳定性的不断提升,钙钛矿太阳能电池的 PCE 会进一步提升[6]。由于钙钛矿材料中含有 Pb 元素,钙钛矿器件在使用过程中会对环境造成一定的污染,Pb 元素的毒性成为商业化和未来的大规模应用的障碍。因此,锡基卤化物钙钛矿材料应运而生,如 CsSnI₃、CH₃NH₃SnI₃ (MASnI₃)和 HC (NH₂)₂SnI₃ (FASnI₃),后两种钙钛矿材料具有低稳定性。全无机无铅 CsSnI₃ 钙钛矿材料具有高吸收系数、小激子结合能、高载流子迁移率等改进的光电特性,是目前最优的光伏候选材料。研究表明,钙钛矿结构中铯(Cs)取代有机阳离子可以显著提高其热稳定性和室外/环境设备性能。在所有无铅全无机 PSC 中,CsSnI₃ 的 PCE 最高,为 10.1% [7] [8]。Chen 等提出了一种钙钛矿吸收材料 CsSnGeI₃,其性能优于纯钙钛矿吸收材料 CsSnI₃ 和 CsGeI₃。基于 CsSnGeI₃ 的器件的 PCE 为 7% [9]。

为了提高 FASnI₃ 锡基钙钛矿薄膜成膜质量、稳定性及器件光电性能等,研究者通过添加剂改性、界面工程、元素掺杂与数值仿真优化等方式提升电池性能。Meng 等[10]以定制化五氟苯氧乙基铵碘化物(FOED)为添加剂,制备高取向、平整的 FASnI₃ 复合钙钛矿薄膜,延长载流子寿命,器件光电转换效率达 10.16%。Chen 等[11]采用两种吡啶取代全氟化物异构体作添加剂,调控薄膜结晶过程,提升成膜质量与器件抗氧化能力。Shi 等[12]引入 4-氟苯乙胺氢溴酸盐(FPEABr)界面修饰层优化能级匹配,电池开路电压提升至 0.974 V,光电转换效率达 15.7%。此外,相关数值模拟研究持续优化器件参数。Khan 等分别通过 Zn 掺杂、结构参数调控、传输层与背接触优化,仿真及优化后器件光电转换效率最高可达 24.87% [13]。数值模拟是理解器件性能与微观结构之间关系的有效途径之一,通过数值的计算可以优化器件结构并设计新的结构。研究过程中采用 CsSnGeI₃/FASnI₃ 为吸收层、TiO₂ 和 Cu₂O 分别作为电子和空穴传输层,利用 SCAPS-1D 软件分析 Gass/FTO/TiO₂/CsSnGeI₃/FASnI₃/Cu₂O/C 结构的钙钛矿太阳能电池的性能。

2. 物理模型和电池结构

SCAPS-1D 软件是基于半导体器件物理基本方程的数值建模并仿真半导体器件的各项性能。SCAPS-1D 软件被用于模拟 CdTe、CIGS 以及钙钛矿太阳能电池的性能。通过构建新型太阳能电池器件的结构、优化材料和缺陷态密度等参数，可以求解太阳能电池中的泊松方程、电子和空穴连续性方程，从而研究电池的载流子输运特性。通过设置材料参数和边界条件，可以得到电池的光谱响应曲线、J-V 特性曲线和电场分布等重要性能参数。泊松方程、电子和空穴连续性方程如公式(1)~(3)：

$$\frac{d}{dx} \left[\varepsilon(x) \frac{d\psi}{dx} \right] = q \left[p(x) - n(x) + N_D^+(x) + P_t(x) - n_t(x) \right] \quad (1)$$

$$-\frac{1}{q} \cdot \frac{dJ_n}{dx} + R_n(x) - G(x) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{q} \cdot \frac{dJ_p}{dx} + R_p(x) - G(x) = 0 \quad (3)$$

式中： x 为位置坐标； J_n 和 J_p 分别为电子和空穴的电流密度； $R_n(x)$ 和 $R_p(x)$ 分别为电子和空穴的复合率； $G(x)$ 为产生率； q 为电子电荷； ε 为相对介电常数； N_A 和 N_D 分别为电离受体浓度和电离施主浓度； P 和 n 分别为自由空穴和自由电子； ψ 为静电势； P_t 和 n_t 分别为俘获空穴和俘获电子。入射光从 FTO 端入射，入射光谱为 AM 1.5 G 太阳光谱，环境温度设置为 300 K。

利用 SCAPS-1D 软件构建结构为 Gass/FTO/TiO₂/CsSnGeI₃/FASnI₃/Cu₂O/C 钙钛矿太阳能电池，如图 1 所示。其中 CsSnGeI₃/FASnI₃ 作为光吸收层，TiO₂ 和 Cu₂O 分别作为电子输层(ETL)和空穴传输层(HTL)，FTO 和 C 分别作为前电极和金属背电极，各层材料能级如图 1(b)所示。器件中各层材料的性能参数，如表 1 所示。

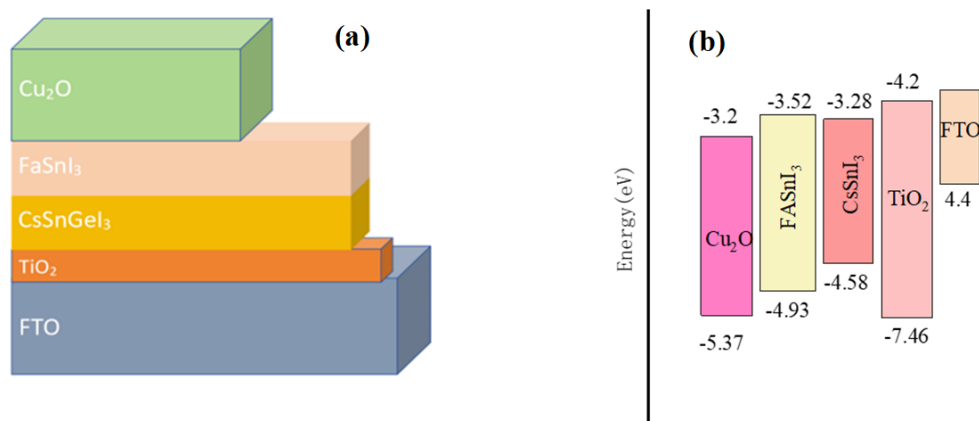


Figure 1. Device structure (a) and energy level diagram (b)
图 1. 器件结构(a)与能级示意图(b)

Table 1. Simulation parameters of materials
表 1. 材料的模拟参数

参数	FTO [14]	TiO ₂ [14]	CsSnGeI ₃ [14] [15]	FASnI ₃ [8]	Cu ₂ O [8] [9]
Thickness/nm	250	150	200	200	350
bandgap (eV)	3.5	3.2	1.5	1.4	2.17

续表

Electron affinity (eV)	4	3.9	3.9	4.12	3.2
Dielectric permittivity (relative)	9	32	28	8.2	7.11
CB effective density of states ($1/\text{cm}^{-3}$)	2.8×10^{18}	1×10^{19}	3.1×10^{18}	1×10^{18}	2.02×10^{17}
VB effective density of states ($1/\text{cm}^{-3}$)	1.8×10^{19}	1×10^{19}	3.1×10^{18}	1×10^{18}	1.1×10^{19}
Electron thermal velocity (cm/s)	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7
Hole thermal velocity (cm/s)	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7
Electron mobility ($\text{cm}^2 \cdot \text{Vs}^{-1}$)	20	20	974	22	200
Hole mobility ($\text{cm}^2 \cdot \text{Vs}^{-1}$)	10	10	213	22	80
Shallow uniform donor density ND ($1/\text{cm}^3$)	1×10^{19}	1×10^{17}	0	0	0
Shallow uniform acceptor density ND ($1/\text{cm}^3$)	0	0	1×10^{14}	7×10^{16}	1×10^{18} [9]

3. 结果与讨论

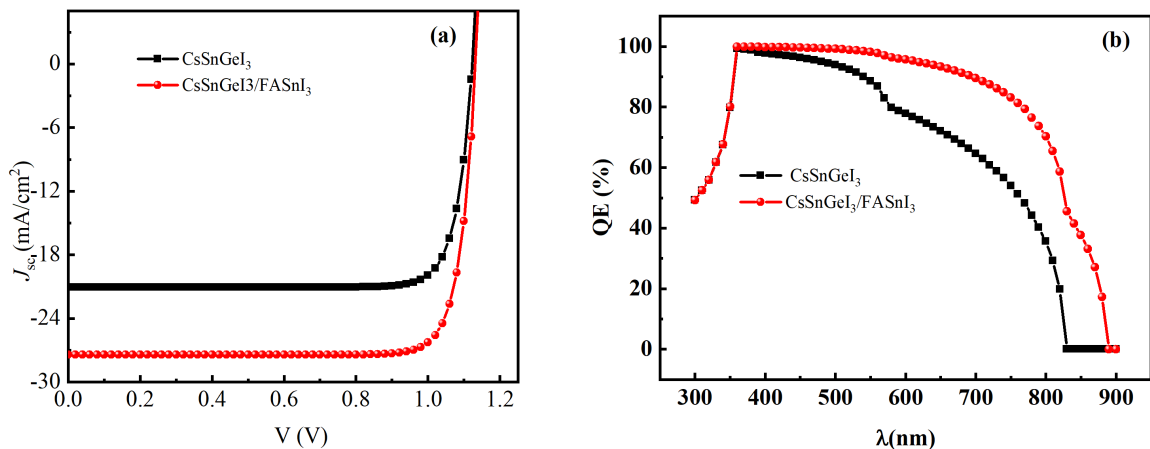


Figure 2. J - V curves (a) and quantum efficiency curves (b) of devices with different structures

图 2. 不同结构器件的 J - V 曲线(a)和量子效率曲线(b)

基于表 1 所示的材料基本参数, 计算了两种不同结构钙钛矿太阳能电池的电流 - 电压(J - V)曲线, 结果如图 2(a) 所示。这两种电池结构分别为 $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{CsSnGeI}_3/\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ 和 $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{CsSnGeI}_3/\text{FASnI}_3/\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ 。通过 SCAPS-1D 软件模拟计算可得, $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{CsSnGeI}_3/\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ 结构电池的开路电压 (V_{oc}) 为 1.12 V, 短路电流密度 (J_{sc}) 为 $21.06 \text{ mA}/\text{cm}^2$, 填充因子 (FF) 为 84.37%, 光电转换效率 (PCE) 为 19.95%; 而 $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{CsSnGeI}_3/\text{FASnI}_3/\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}$ 结构电池的 V_{oc} 提升至 1.31 V, J_{sc} 达到 $27.42 \text{ mA}/\text{cm}^2$, FF 为 84.63%, PCE 高达 26.26%。上述结果表明, 采用 $\text{CsSnGeI}_3/\text{FASnI}_3$ 作为双吸收层的钙钛矿太阳能电池, 其综合光电性能显著优于单一 CsSnGeI_3 吸收层器件。图 2(b) 两种不同结构钙钛矿太阳能电池的量子效率曲线。图 2(b) 是 CsSnGeI_3 与 $\text{CsSnGeI}_3/\text{FASnI}_3$ 两种钙钛矿薄膜的外量子效率 (EQE) 光谱响应曲线。在 400~900 nm 内区, $\text{CsSnGeI}_3/\text{FASnI}_3$ 复合结构 EQE 始终高于 CsSnGeI_3 器件的量子效率, 尤其在 600~850 nm 区间具

有优异的光谱响应能力，且其 EQE 截止波长显著红移，表明 $FASnI_3$ 的引入有效拓宽了光响应范围并提升了光电转换效率。

3.1. $CsSnGeI_3$ 厚度对器件性能影响

钙钛矿层吸收能量大于带隙(E_g)的光子后产生激子，激子在吸收层与载流子传输层的界面分离后，光生电子和光生穴继续沿着相应的载流子传输层运动[16]。光吸收层厚度参数对提升器件性能具有至关重要的作用[13]。在模拟计算中， $CsSnGeI_3$ 厚度的变化范围设置为 100~1000 nm，其余材料性能参数保持恒定。图 3 是 $CsSnGeI_3/FASnI_3$ 结构器件性能随 $CsSnGeI_3$ 厚度变化曲线。由图 3(a)可知， V_{oc} 随 $CsSnGeI_3$ 厚度增加呈单调下降趋势； J_{sc} 则随厚度增加先快速提升，随后增长趋于平缓，这一现象可归因于光吸收层厚度增加增强了光子吸收能力，能迅速提高吸光层对光光的吸收率[17]。与此同时， $CsSnGeI_3$ 厚度的增加会导致电池等效串联电阻升高，进而对 FF 产生不利影响。从图 3(c)可见，当 $CsSnGeI_3$ 厚度超过 200 nm 时， FF 随厚度增加而持续降低。当 $CsSnGeI_3$ 厚度为 500 nm 时，器件获得最优 PCE ，其值为 26.70%。

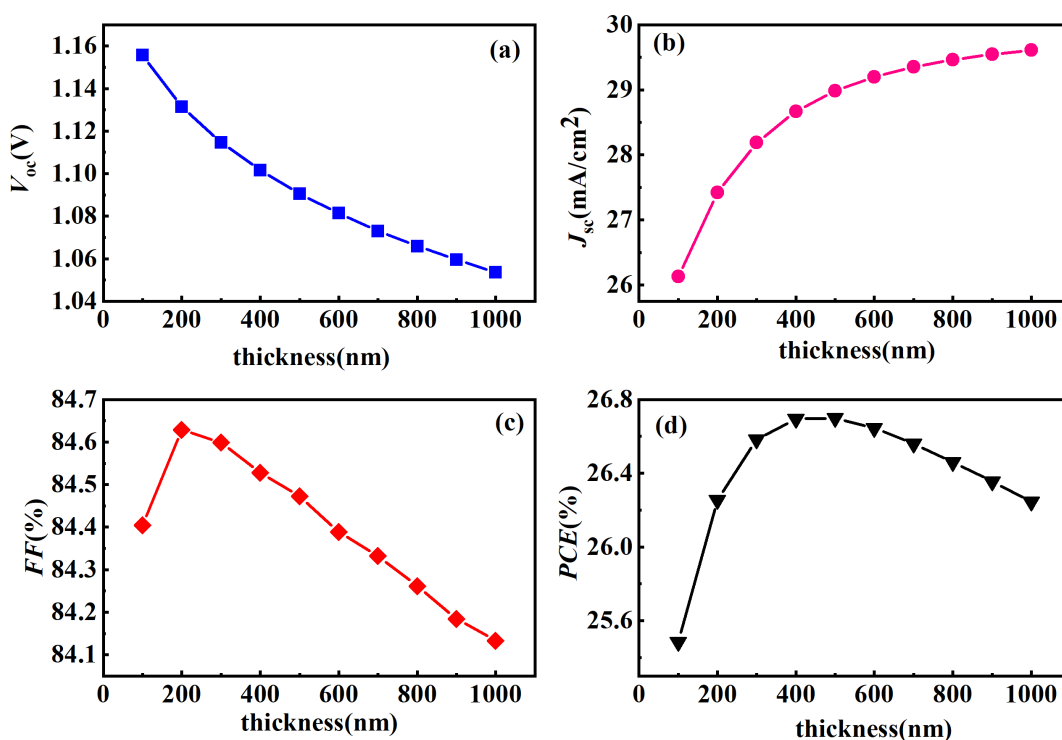


Figure 3. Changes of V_{oc} , J_{sc} , FF , and PCE with the thickness of $CsSnGeI_3$

图 3. V_{oc} 、 J_{sc} 、 FF 、 PCE 随 $CsSnGeI_3$ 厚度的变化图

3.2. $FASnI_3$ 厚度对器件性能影响

在此基础上，进一步探究 $FASnI_3$ 厚度在 100~1000 nm 范围内对器件性能参数的影响，结果如图 4 所示。 $FASnI_3$ 厚度为 400 nm 时 V_{oc} 达到最大值，随着 $FASnI_3$ 厚度的增加， V_{oc} 减小；而 J_{sc} 、 FF 与 PCE 随 $FASnI_3$ 厚度增大整体呈上升趋势。吸收层厚度增加可有效增强光吸收，产生更多的光生载流子，从而提高 J_{sc} 与 PCE [18]。当吸收层厚度大于载流子扩散长度时，未被收集的载流子会提高复合效率，导致 V_{oc} 下降，进而降低器件的整体性能[6]。此外，吸收层厚度增大也会引入更多缺陷态，提高载流子复合并进一步增加暗饱和和电流的数值，当光生电流增加值小于暗饱和和电流增长值时， V_{oc} 随之降低[19]。

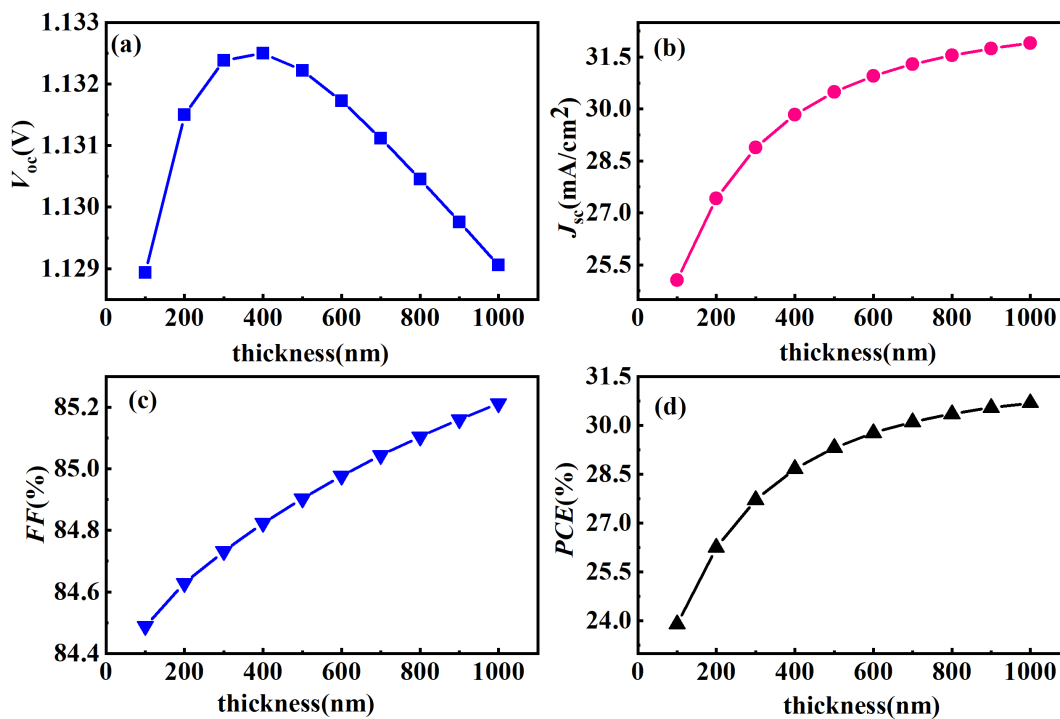


Figure 4. Changes of V_{oc} , J_{sc} , FF , and PCE with the thickness of $FASnI_3$
 图 4. V_{oc} 、 J_{sc} 、 FF 、 PCE 随 $FASnI_3$ 厚度的变化图

3.3. $FASnI_3/CsSnGeI_3$ 界面缺陷对器件性能的影响

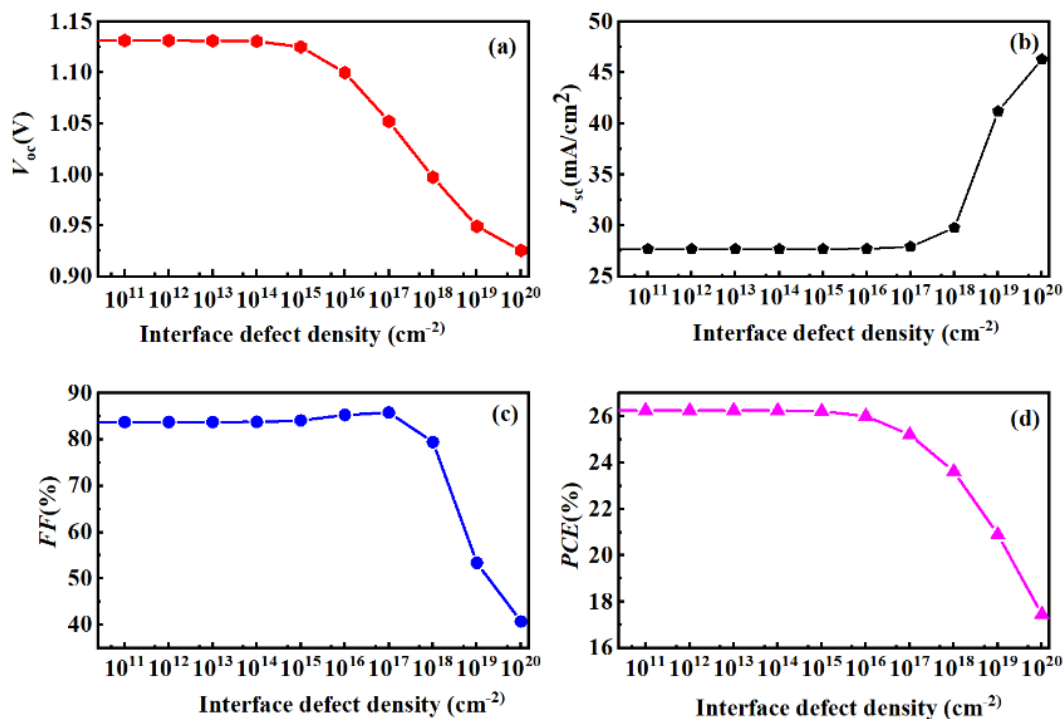


Figure 5. Changes of V_{oc} , J_{sc} , FF , and PCE with the interface defect density of the $FaSnI_3/CsSnGeI_3$
 图 5. V_{oc} 、 J_{sc} 、 FF 、 PCE 随 $FaSnI_3/CsSnGeI_3$ 界面缺陷密度的变化图

钙钛矿卤化物在制备过程会在晶界和界面处产生缺陷，这些表面缺陷和晶界缺陷可作为卤素离子迁移的途径。缺陷引起的离子迁移将在高电流密度下引发 EQE 下降、产生焦耳热和加剧载流子注入不平衡的现象，最终导致器件性能的退化[20] [21]。研究过程中通过调控 $\text{FASnI}_3/\text{CsSnGeI}_3$ 界面缺陷，进一步优化器件性能。

$\text{FASnI}_3/\text{CsSnGeI}_3$ 界面缺陷对器件性能的影响如图 5 所示。当 $\text{FASnI}_3/\text{CsSnGeI}_3$ 吸收层缺陷态密度小于 10^{15} cm^{-2} 时， V_{oc} 、 J_{sc} 、 FF 和 PCE 几乎保持不变。而 $\text{FASnI}_3/\text{CsSnGeI}_3$ 吸收层缺陷态密度大于 10^{15} cm^{-2} 时， V_{oc} 、 J_{sc} 和 PCE 随着 $\text{FASnI}_3/\text{CsSnGeI}_3$ 界面缺陷的增加而减小，但 J_{sc} 随着 $\text{FASnI}_3/\text{CsSnGeI}_3$ 界面缺陷的增加而增加。但当吸收层缺陷态密度大于 10^{15} cm^{-2} 时， $\text{FASnI}_3/\text{CsSnGeI}_3$ 界面形成了载流子复合中心，增加了电子与空穴的复合速率，导致电池性能变差，导致 V_{oc} 、 FF 、 PCE 减小。而当 $\text{FASnI}_3/\text{CsSnGeI}_3$ 界面缺陷大于 10^{17} cm^{-2} 时， J_{sc} 开始上升是因为钙钛矿材料中的缺陷可以形成一些缺陷态能级，这些能级可能会对特定波长的光产生额外的吸收。光吸收可以产生更多的光生载流子，进而增加短路电流。

3.4. 传输层厚度对器件性能的影响

ETL 和 HTL 在太阳能电池中起着关键作用，ETL 传输电子并阻碍空穴，HTL 传输空穴并阻碍电子，选择合理厚度的 ETL 和 HTL 有利于降低载流子在界面处复合。研究过程中 TiO_2 厚度的变化范围为 100~1000 nm。图 6 为 V_{oc} 、 J_{sc} 、 FF 和 PCE 随 TiO_2 厚度曲线。从图 6 可以看出， V_{oc} 、 J_{sc} 、 FF 和 PCE 随 TiO_2 对 TiO_2 厚度的增加而减小。这可能是随着 TiO_2 厚度的增加，在 TiO_2 表面存在一些点缺陷和晶格缺陷，如氧空位， Ti^{3+} 离子等，它们可以充当电荷复合中心并阻碍电子从钙钛矿迁移到电子传输层，从而导致 PCE 降低[22]。

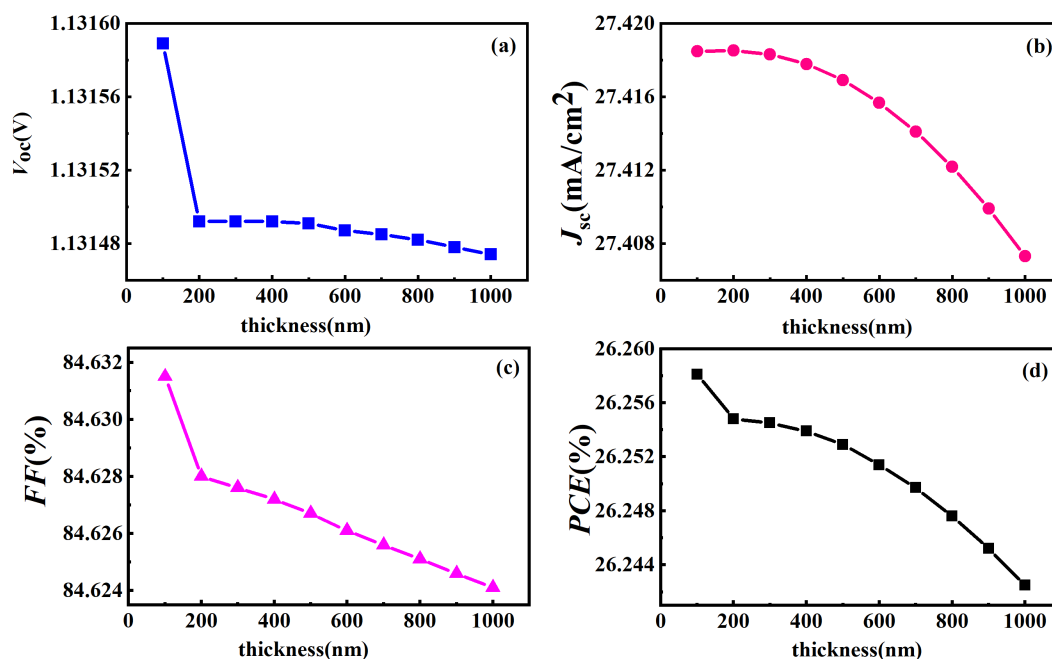


Figure 6. Changes of V_{oc} , J_{sc} , FF , and PCE with TiO_2 thickness

图 6. V_{oc} 、 J_{sc} 、 FF 、 PCE 随 TiO_2 厚度的变化图

同时研究空穴传输层对器件性能的影响，研究过程中 Cu_2O 厚度变化范围为 100~1000 nm。图 7 是 V_{oc} 、 J_{sc} 、 FF 和 PCE 随 Cu_2O 厚度的曲线。从图中可以看出，随着 Cu_2O 厚度增加， V_{oc} 、 J_{sc} 、 FF 和 PCE

逐渐增加, 随后增加幅度逐渐减小。面增加得较缓慢。这是由于当 Cu_2O 厚度过薄时, 薄膜可能不连续、存在针孔, 导致空穴传输路径受阻, 产生严重的复合损失。随着厚度增加, 薄膜连续性和均匀性得到改善, 空穴传输能力显著增强, 电荷复合减少, 从而提升了 V_{oc} 、 J_{sc} 、 FF 和 PCE 。

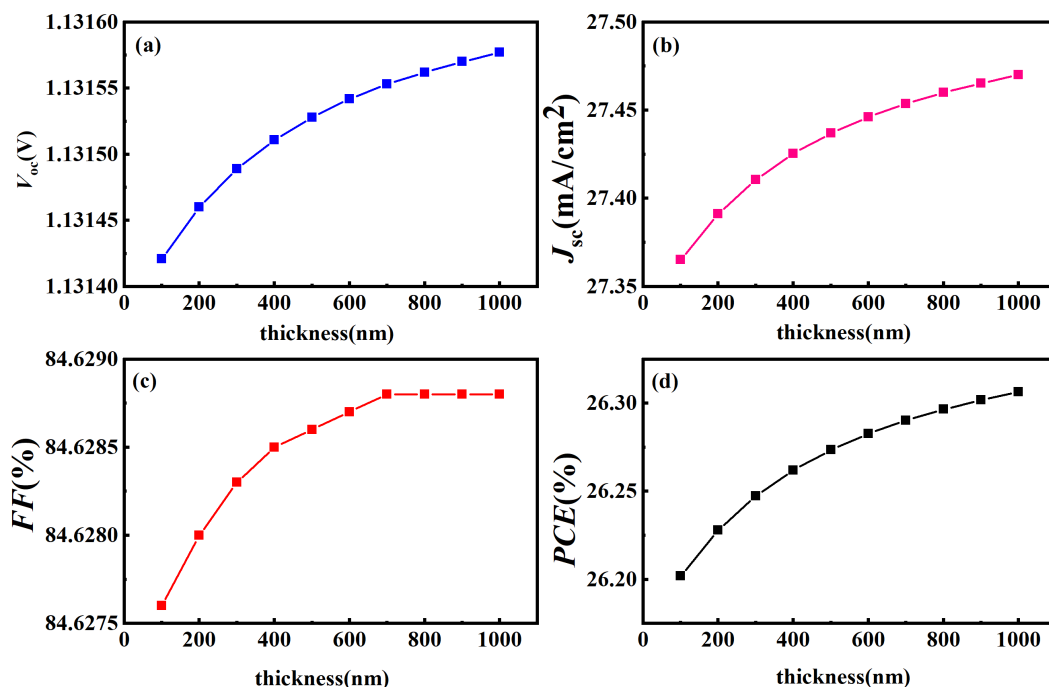


Figure 7. Changes of V_{oc} , J_{sc} , FF , and PCE with Cu_2O thickness

图 7. V_{oc} 、 J_{sc} 、 FF 、 PCE 随 Cu_2O 厚度的变化图

4. 结论

利用 SCAPS-1D 软件研究了 $\text{CsSnGeI}_3/\text{FASnI}_3$ 双吸收层无铅钙钛矿太阳能电池的性能。结果表明： $\text{CsSnGeI}_3/\text{FASnI}_3$ 双吸收层可有效拓宽光谱响应范围, 显著提升器件的 V_{oc} 、 J_{sc} 与 PCE ；吸收层厚度优化显示, 当 CsSnGeI_3 厚度为 500 nm 时, 期间获得最优 $PCE = 26.70\%$, FASnI_3 厚度增加有利于提升 J_{sc} 与 PCE , 但过厚会加剧载流子复合并造成 V_{oc} 降低； $\text{FASnI}_3/\text{CsSnGeI}_3$ 界面缺陷态密度大于 10^{15} cm^{-2} 时会形成大量复合中心, 导致器件性能下降, 因此界面工程对降低缺陷密度、提升效率与稳定性至关重要； TiO_2 厚度增加会引入更多缺陷复合中心而降低器件性能, Cu_2O 厚度增加则可改善薄膜连续性与空穴传输能力, 但过厚会使性能增幅趋缓, 合理匹配传输层厚度是实现高效电荷提取与传输的关键。

基金项目

国家级大学生创新创业项目(2024106660802, 2024106660798, 202510666449)。

参考文献

- [1] Maho, A., Lobet, M., Daem, N., Piron, P., Spronck, G., Loicq, J., *et al.* (2021) Photonic Structuration of Hybrid Inverse-Opal TiO_2 -Perovskite Layers for Enhanced Light Absorption in Solar Cells. *ACS Applied Energy Materials*, **4**, 1108-1119. <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c02124>
- [2] Yu, X., Wang, Y., Zhang, J., Duan, J., Yang, X., Liu, L., *et al.* (2020) Halogen Regulation of Inorganic Perovskites toward Robust Triboelectric Nanogenerators and Charging Polarity Series. *Journal of Materials Chemistry A*, **8**, 14299-

14307. <https://doi.org/10.1039/d0ta05531j>
- [3] Brenner, T.M., Egger, D.A., Kronik, L., Hodes, G. and Cahen, D. (2016) Hybrid Organic—Inorganic Perovskites: Low-Cost Semiconductors with Intriguing Charge-Transport Properties. *Nature Reviews Materials*, **1**, 1-16. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2015.7>
- [4] Miyata, A., Mitioglu, A., Plochocka, P., Portugall, O., Wang, J.T., Stranks, S.D., *et al.* (2015) Direct Measurement of the Exciton Binding Energy and Effective Masses for Charge Carriers in Organic-Inorganic Tri-Halide Perovskites. *Nature Physics*, **11**, 582-587. <https://doi.org/10.1038/nphys3357>
- [5] Celik, I., Phillips, A.B., Song, Z., Yan, Y., Ellingson, R.J., Heben, M.J., *et al.* (2017) Environmental Analysis of Perovskites and Other Relevant Solar Cell Technologies in a Tandem Configuration. *Energy & Environmental Science*, **10**, 1874-1884. <https://doi.org/10.1039/c7ee01650f>
- [6] 李诗文, 周豹, 赵啟融, 等. 基于 SCAPS-1D 的钙钛矿太阳能电池性能的数值模拟与性能优化比较理论分析[J]. 物理学报, 2025, 74(12): 322-330.
- [7] Ye, T., Wang, X., Wang, K., Ma, S., Yang, D., Hou, Y., *et al.* (2021) Localized Electron Density Engineering for Stabilized B- γ CsSnI₃-Based Perovskite Solar Cells with Efficiencies > 10%. *ACS Energy Letters*, **6**, 1480-1489. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c00342>
- [8] Li, B., Di, H., Chang, B., Yin, R., Fu, L., Zhang, Y., *et al.* (2021) Efficient Passivation Strategy on Sn Related Defects for High Performance All-Inorganic CsSnI₃ Perovskite Solar Cells. *Advanced Functional Materials*, **31**, Article ID: 2007447. <https://doi.org/10.1002/adfm.202007447>
- [9] Chen, M., Ju, M., Garcés, H.F., Carl, A.D., Ono, L.K., Hawash, Z., *et al.* (2019) Highly Stable and Efficient All-Inorganic Lead-Free Perovskite Solar Cells with Native-Oxide Passivation. *Nature Communications*, **10**, Article No. 16. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07951-y>
- [10] Meng, X., Wang, Y., Lin, J., Liu, X., He, X., Barbaud, J., *et al.* (2020) Surface-Controlled Oriented Growth of FASnI₃ Crystals for Efficient Lead-Free Perovskite Solar Cells. *Joule*, **4**, 902-912. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.03.007>
- [11] Chen, J., Luo, J., Hou, E., Song, P., Li, Y., Sun, C., *et al.* (2024) Efficient TiN-Based Perovskite Solar Cells with Trans-Isomeric Fulleropyrrolidine Additives. *Nature Photonics*, **18**, 464-470. <https://doi.org/10.1038/s41566-024-01381-7>
- [12] Shi, Y., Zhu, Z., Miao, D., Ding, Y. and Mi, Q. (2024) Interfacial Dipoles Boost Open-Circuit Voltage of Tin Halide Perovskite Solar Cells. *ACS Energy Letters*, **9**, 1895-1897. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.4c00529>
- [13] Khan, F., Fatima Rasheed, J., Ahmad, V., Alshahrani, T., Ali, S.K., Alshomrany, A.S., *et al.* (2024) Studies on the Performance of FaSnI₃:Zn²⁺-Based Lead-Free Perovskite Solar Cells: A Numerical Simulation. *Optik*, **306**, Article ID: 171810. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.171810>
- [14] Singh, N.K. and Agarwal, A. (2023) Performance Assessment of Sustainable Highly Efficient CsSn_{0.5}Ge_{0.5}I₃/FASnI₃ Based Perovskite Solar Cell: A Numerical Modelling Approach. *Optical Materials*, **139**, Article ID: 113822. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.113822>
- [15] Sabbah, H. (2022) Numerical Simulation of 30% Efficient Lead-Free Perovskite CsSnGeI₃-Based Solar Cells. *Materials*, **15**, Article No. 3229. <https://doi.org/10.3390/ma15093229>
- [16] 李璞, 甘永进, 余小燕, 等. 全无机钙钛矿太阳能电池性能仿真研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(6): 5-9.
- [17] 余首柘, 涂洁磊, 李雷, 等. CsSn_{0.5}Ge_{0.5}I₃ 钙钛矿太阳能电池性能的仿真研究[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2022, 42(5): 1-6.
- [18] 张勇. 低成本钙钛矿太阳能电池的模拟与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [19] 许志刚, 王建峰. 基于无机空穴传输层的 CsPbI₃ 太阳能电池研究[J]. 中国计量大学学报, 2021, 32(2): 282-290.
- [20] Lu, M., Guo, J., Sun, S., Lu, P., Wu, J., Wang, Y., *et al.* (2020) Bright CsPbI₃ Perovskite Quantum Dot Light-Emitting Diodes with Top-Emitting Structure and a Low Efficiency Roll-Off Realized by Applying Zirconium Acetylacetonate Surface Modification. *Nano Letters*, **20**, 2829-2836. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c00545>
- [21] Zhang, S., Liu, H., Li, X. and Wang, S. (2020) Enhancing Quantum Yield of CsPb(Br_xCl_{1-x})₃ Nanocrystals through Lanthanum Doping for Efficient Blue Light-Emitting Diodes. *Nano Energy*, **77**, Article ID: 105302. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105302>
- [22] 李纪伟. 钙钛矿太阳能电池中电子传输层的界面优化及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.