

基于MAGeI₃钙钛矿太阳能电池结构的设计及性能研究

吴远航^{1*}, 欧阳雨洁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: 2025年4月9日; 录用日期: 2025年5月29日; 发布日期: 2025年6月30日

摘 要

本文利用Scaps-1d软件设计了甲基铵碘化锗(MAGeI₃)作为光吸收层, 硫氰酸亚铜(CuSCN)作为空穴传输层, TiO₂作为电子传输层, ITO和Au分别为前、后接触电极的Ge基钙钛矿太阳能电池。研究了空穴传输层的带隙、受主掺杂浓度、钙钛矿吸收层的缺陷态密度, 以及MAGeI₃/CuSCN界面缺陷等关键参数对器件性能的影响, 优化后, 器件的光电转换效率为33.82%, 相比初始参数下得到的光电转化效率24.07%, 提高了9.75%。

关键词

钙钛矿太阳能电池, 光电转换效率, 空穴传输层, 缺陷态密度

Design and Performance Study of MAGeI₃ Perovskite Solar Cell Structure

Yuanhang Wu^{1*}, Yujie Ouyang¹, 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: Apr. 9th, 2025; accepted: May 29th, 2025; published: Jun. 30th, 2025

Abstract

This paper designs a perovskite solar cell based on Ge-based using Scaps-1d software, with methylam-

*第一作者。

#通讯作者。

monium germanium iodide (MAGeI₃) as the light absorption layer, copper(I) thiocyanate (CuSCN) as the hole transport layer, TiO₂ as the electron transport layer, and ITO and Au as the front and back contact electrodes, respectively. The effects of key parameters such as the bandgap of the hole transport layer, acceptor doping concentration, defect state density of the perovskite absorption layer, and interface defects between MAGeI₃ and CuSCN on device performance are investigated. After optimization, the power conversion efficiency of the device reaches 33.82%, which is 9.75% higher than the initial efficiency of 24.07%.

Keywords

Perovskite Solar Cells, Power Conversion Efficiency, Hole Transport Layer, Defect State Density

Copyright © 2025 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

太阳能不仅清洁环保,还具有取之不尽、用之不竭等诸多优势。有效地利用太阳能,将在很大程度上缓解能源危机问题。太阳能电池的发展经历了三代:第一代晶硅太阳能电池,第二代薄膜太阳能电池和第三代新概念太阳能电池[1]。第三代太阳能电池包括染料敏化太阳能电池和新型有机太阳能电池。第三代太阳能电池中,钙钛矿太阳能电池成为研究热点。钙钛矿材料通式为 ABX₃,其中 A 为有机甲基铵(CH₃NH³⁺)离子或甲酰胺(NH₂CH=NH²⁺)离子, B 为无机阳离子,如 Pb²⁺或 Sn²⁺, X 为卤素离子,如 I⁻、Br⁻或 Cl⁻。甲基铵碘化铅(MAPbI₃)是一种常用的钙钛矿太阳能电池吸收材料[2]。

MASnI₃ 为光吸收层的钙钛矿太阳能电池中, TiO₂ 作为电子传输层, 硫氰酸亚铜作为空穴传输层(HTL)时, 其光电转换效率(PCE)可达 28.32% [3]。然而, 由于铅(Pb)的毒性阻碍了该材料的大规模商业应用。Devi 和 Lakhdar [3] [4]指出, MAPbI₃ 中材料中 Pb 离子可被锡(Sn)或锗(Ge)离子取代, 可以作为环保无毒的钙钛矿太阳能电池的光吸收层。甲基铵碘化锗(MAGeI₃)具有更好的稳定性和环保性。与 Pb 基钙钛矿材料相比, MAGeI₃ 的光吸收层在高温下(高达 150℃)表现出更好稳定性。Sagar 等研究了 AM1.5 光照下的光伏参数的钙钛矿太阳能电池器件, 发现其 PCE 最高可达 18.3% [5]。Deepthi 等人对以甲基铵碘化铅(MAPbI₃)和甲基铵碘化锗(MAGeI₃)为光吸收层的钙钛矿太阳能电池性能进行了理论研究。研究表明, FTO/SnO₂/MAPbI₃/NiO/Au 结构的 PCE 为 20.58%, 填充因子(FF)为 68.34%; 而 FTO/SnO₂/MAGeI₃/CuO/Pd 结构的 PCE 为 13.12%, FF 为 68.29% [6]。Saugata 等人成功研发了一种新型结构, 该结构以有机钙钛矿甲基铵碘化锗(MAGeI₃)作为光吸收层, 利用 SCAPS-1D 软件研究了不同参数对器件性能的影响。研究表明, MAPbI₃ 和 c-Si 单结器件的 PCE 值分别为 20.19%和 23.01% [7]。

CuSCN 具有高透明、高稳定、低成本、易解决等特点, 被用作太阳能电池的空穴传输层材料[5]。该材料是一种无机空穴传输材料, 其带隙为 3.8 eV, 使其在可见光范围内几乎没有吸收[8]。Li 等人利用 CuSCN 作为 HTL 来提高 Sb₂Se₃ 太阳能电池的光电转换效率, 其数值为达到 7.50% [9]。Zhao 等人利用溶液处理的 CuSCN 作为 HTL 构建了混合有机-无机钙钛矿基 p-i-n 平面异质结太阳能电池, 光电转换效率 PCE 为 10.8% [8]。Hou 等人利用 F4TCNQ 改善 CuSCN 的电导率和 CuSCN/钙钛矿界面的能带排列。研究表明 PSCs 的 PCE 提高了 11%。此外, 得益于 p 型 CuSCN 材料优异的透明度, 所制备的双面半透明 n-i-p 平面 PSCs 在正面和背面照明下的最大转换效率分别为 14.8%和 12.5% [10]。Nilushi 等人报道了从

氨水中处理硫 CuSCN 作为 HTL。它基于水处理 CuSCN 空穴传输层 HTL 的有机体异质结和平面有机金属卤化物钙钛矿太阳能电池的 *PCE* 分别为 10.7%和 17.5% [11]。

本文主要利用 Scaps-1d 软件构造结构为 ITO/TiO₂/MAGeI₃/CuSCN/Au 钙钛矿太阳能电池，通过研究空穴传输层的厚度、带隙、缺陷态密度等因素对 Ge 基钙钛矿太阳能电池光伏性能的影响。

2. 理论和模型

Scaps-1d 软件是由比利时根特大学开发的一维太阳能电池模拟程序，广泛应用于钙钛矿太阳能电池的器件模拟领域。该软件具有较强的通用性，能够精准模拟计算多种类型的太阳能电池，如硅基电池、薄膜太阳能电池以及备受瞩目的钙钛矿太阳能电池。该软件功能强大，兼具操作简便的优势。在对钙钛矿太阳能电池性能进行评估时，该程序能够为研究者提供有力支持，并筛选出最适合、最高效的方案应用于电池设计中。Scaps-1d 软件基于半导体方程和泊松方程进行求解，从而精准呈现钙钛矿太阳能电池的全方位性能。相关半导体和泊松方程如公式(1)~(3)所示。

$$\nabla \cdot \nabla_{\phi} = -q(p - n + N_D - N_A) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot J_n = q(R - G) + q \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2)$$

$$-\nabla \cdot J_p = q(R - G) + q \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

其中： ψ ：电势； p ：自由载流子空穴浓度和 n ：电子浓度； J_n ：电子电流密度； J_p ：空穴电流密度。同时， R 和 G 则分别表示电子和空穴对的复合率和产生率[3]。仿真过程中，各层材料的设置参数如表 1 所示。利用 Scaps-1d 软件构建了结构为 ITO/TiO₂/MAGeI₃/CuSCN/Au 钙钛矿太阳能电池，如图 1(a)所示。图 1(b)是钙钛矿太阳能电池材料的能级图。计算过程温度 $T = 300 \text{ K}$ ，光强为 AM 1.5，光从 ITO 导电玻璃入射。利用 Scaps-1d 计算钙钛矿太阳能电池的各项性能。

Table 1. Material parameters of each layer in device simulation

表 1. 器件仿真过程中各层材料参数

参数	CuSCN [11]	MAGeI ₃ [3]	TiO ₂ [12]	ITO [12]
厚度(nm)	300	400	300	100
能带带隙(eV)	3.40	1.90	3.20	3.50
电子亲和势(eV)	2.10	3.98	3.90	3.90
相对介电常数	10.00	10.00	10.00	9.00
有效导带密度(cm ⁻³)	2.50×10^{18}	1.00×10^{16}	2.20×10^{18}	2.20×10^{18}
有效价带密度(cm ⁻³)	1.80×10^{19}	1.00×10^{15}	1.80×10^{18}	1.80×10^{19}
电子迁移率(cm ² /Vs)	2.00×10^{-4}	1.62	2.00×10^1	2.00×10^1
空穴迁移率(cm ² /Vs)	1	1.01	1.00×10^1	1.00×10^1
施主掺杂浓度(cm ⁻³)	0	1.00×10^9	1.00×10^{19}	1.00×10^{19}
受主掺杂浓度(cm ⁻³)	1.00×10^{18}	0	0	0
缺陷态密度(cm ⁻³)	1.00×10^{14}	1.00×10^{14}	1.00×10^{16}	1.00×10^{16}

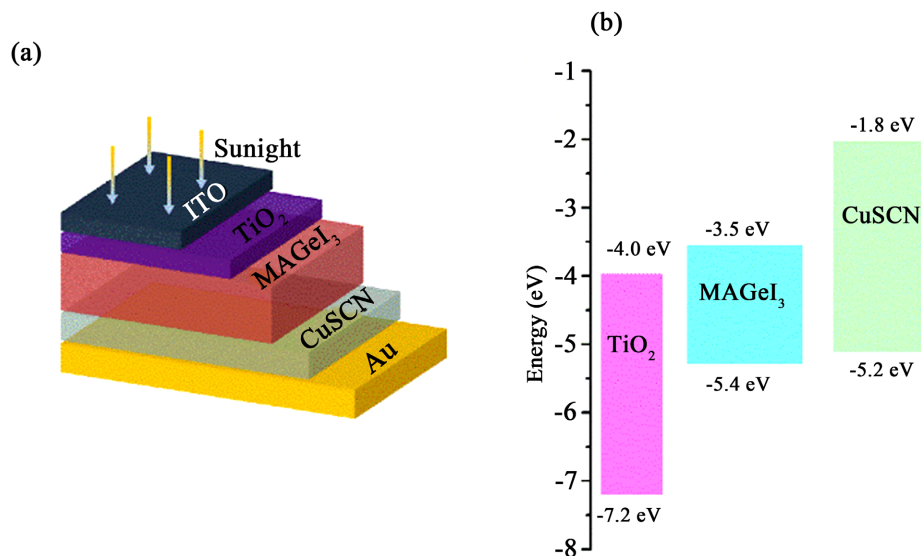


Figure 1. (a) Perovskite solar cell structure; (b) material energy level
图 1. (a) 钙钛矿太阳能电池结构; (b) 材料能级

3. 结果与讨论

图 2 是钙钛矿太阳能电池中材料能级随位置的变化关系。从图中可以清晰地看到，在 $\text{MAGeI}_3/\text{CuSCN}$ 界面处形成了一个导带差，这一结构有利于空穴的传输；而在 $\text{MAGeI}_3/\text{TiO}_2$ 界面处则存在价带之差，这有利于电子的传输。因此从能级结构可以看出，该器件选择 CuSCN 作为空穴传输层， TiO_2 作为电子传输层，能进一步减小载流子的复合率，从而进一步提升器件的光电转换效率。基于表 1 中各层材料的参数，利用 Scaps-1d 软件对钙钛矿太阳能电池在 AM 1.5 光照条件下的性能进行了模拟计算。计算得到的光伏曲线与量子效率曲线如图 3 所示。图 3(a) 是钙钛矿太阳能电池的光伏曲线，其光电转换效率达到了 24.07%。图 3(b) 是钙钛矿太阳能电池的量子效率曲线。通过观察可以发现，在波长为 300~600 nm 的范围内，量子效率呈现出逐渐增大的趋势；而当波长大于 650 nm 时，量子效率开始减小，甚至趋于零。这是由于材料不能吸收较长波长的光子。

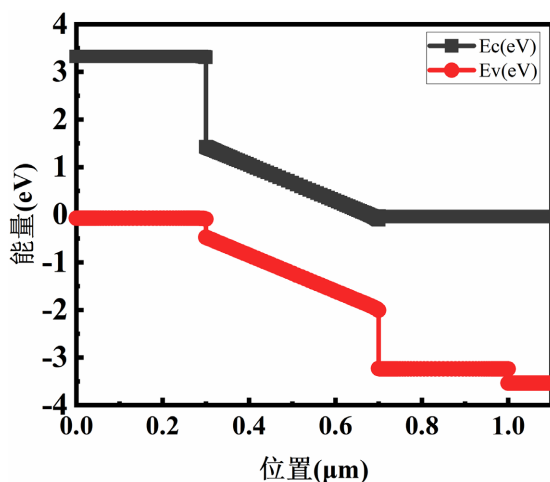


Figure 2. Energy band diagram of perovskite solar cells
图 2. 钙钛矿太阳能电池能带图

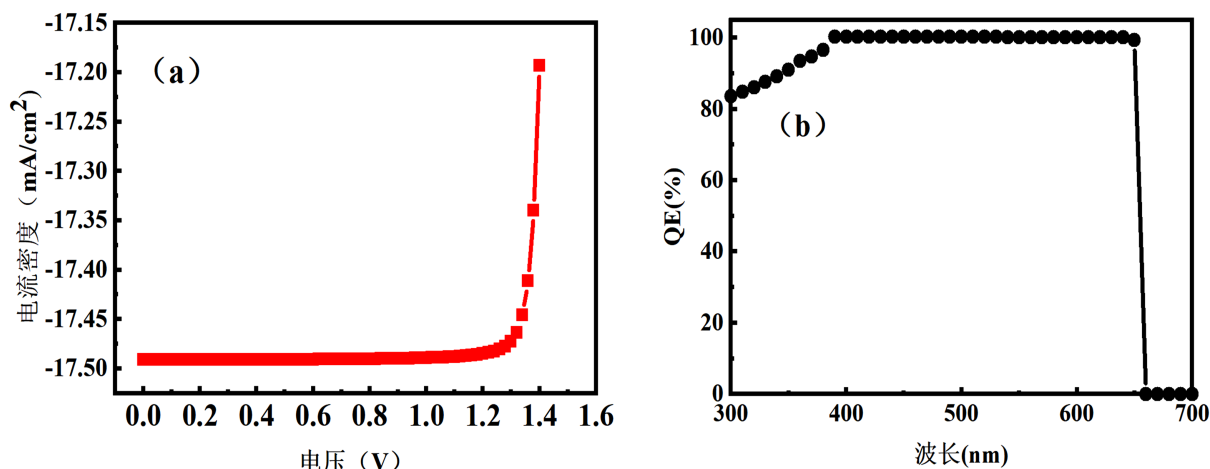
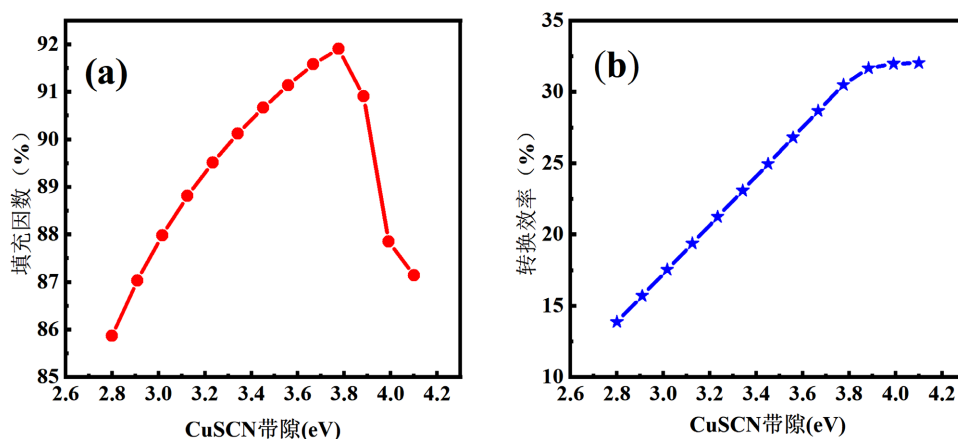


Figure 3. (a) J-V curve of perovskite solar cells; (b) Quantum efficiency

图 3. (a) 钙钛矿太阳能电池光伏曲线; (b) 量子效率

3.1. CuSCN 的带隙对器件性能的影响

空穴传输层的带隙决定了其价带位置和导带位置。合适的带隙可以确保空穴能够高效地从钙钛矿层转移到空穴传输层，并最终到达电极。同时，如果空穴传输层的带隙过大，可能导致其价带位置过高，从而在钙钛矿/HTL 界面形成势垒，阻碍空穴的传输，增加载流子复合。这些影响主要体现在吸收能力、光电转换效率以及稳定性等方面。因此，在计算过程中，重点研究了空穴传输层 CuSCN 的带隙在 2.8~4.1 eV 范围内对钙钛矿太阳能电池性能的影响，如图 4 所示。从图 4(a)可以看出，带隙为 2.8~3.8 eV 范围内，填充因数呈现出明显的增大趋势，随后逐渐减小。图 4(b)表明，带隙为 2.8~3.9 eV 范围内，光电转换效率稳步上升，当带隙为 3.9~4.1 eV 范围时，光电转换效率逐渐趋于饱和。开路电压的变化趋势与光电转换效率具有类似的变化相似，如图 4(c)所示，当带隙小于 4.0 eV 时，开路电压稳步上升，而当带隙大于 4.0 eV 时，其增长趋势逐渐平缓，甚至达到最大值。此外，短路电流密度在带隙为 2.8~3.4 eV 范围内呈线性增长，但当带隙大于 3.4 eV 时，其变化则变得不规则。总体而言，随着空穴传输层 CuSCN 的带隙增大，钙钛矿太阳能电池的填充因数、转换效率和开路电压均有所提高。然而，这并不意味着带隙越大越好，而是需要将其控制在一定范围内，以实现电池性能的最优化。经过综合分析，当选择带隙为 3.8 eV 左右时，钙钛矿太阳能电池的性能表现最为优异，其开路电压可达 1.90 V，短路电流密度为 17.49 mA/cm²，填充因数为 90.90%，转换效率高达 31.47%。



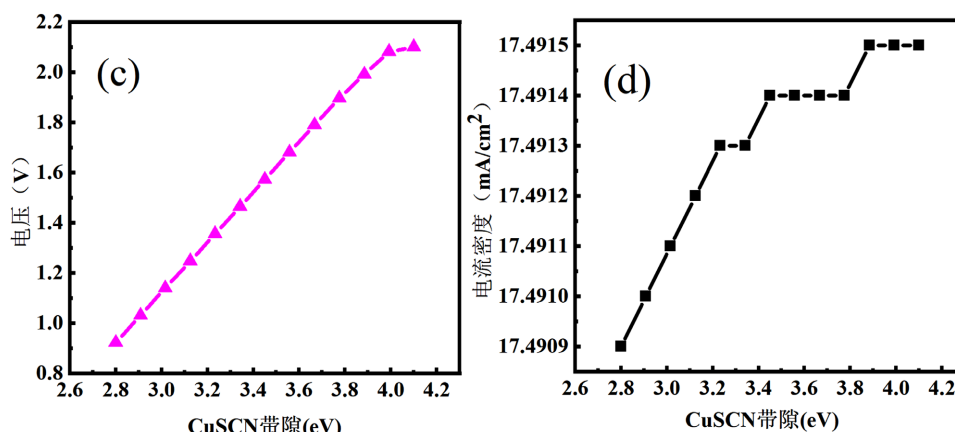


Figure 4. (a) Filling factor; (b) power conversion efficiency; (c) open circuit voltage; (d) current density curve with CuSCN bandgap

图 4. (a) 填充因数; (b) 转换效率; (c) 开路电压; (d) 电流密度随 CuSCN 带隙的变化曲线

3.2. CuSCN/MAGeI₃ 界面缺陷对器件性能的影响

在 Ge 基钙钛矿太阳能电池中, 不仅选用 CuSCN 作为更具特性的空穴传输层材料, 而且选用甲基铵碘化铅(MAPbI₃)作为光吸收材料, 但铅(Pb)的毒性阻止了这种材料的大规模商业应用。相比之下, 甲基铵碘化锗(MAGeI₃)具有更好的稳定性和环保性, 且 Ge 材料在高达 150℃ 的高温范围内具有更好的稳定性。

空穴传输层 CuSCN 带隙对器件的光电性能具有重要的影响, 同时在材料之间的界面缺陷也会对太阳能电池造成影响, 由于不同材料层之间的界面复合是影响电池性能的重要因素, 界面缺陷会降低性能并导致大量的复合[3], 意味着器件内部的电子和空穴更容易在缺陷处相遇并重新结合, 从而减少了有效的光生载流子数量。这会降低短路电流, 并可能对开路电压产生影响, 因为开路电压与光生载流子的数量有关。其次, 界面缺陷可能会阻碍电荷的传输。在有机太阳能电池中, 界面缺陷可能导致电子和空穴的传输受阻, 从而降低填充因子。在研究过程中, CuSCN/MAGeI₃ 界面缺陷数值设置在 $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 范围, 探究 CuSCN/MAGeI₃ 界面缺陷对钙钛矿太阳能电池性能的影响, 计算结果如图 5 所示。图 5(a)是开路电压与界面缺陷的关系。当界面缺陷增大时, 开路电压逐渐减小。当界面缺陷大于 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时, 开路电压降趋于稳态。从图 5(b)可以看到, 电流密度随着界面缺陷的增大而以一定趋势逐渐减小。界面缺陷逐渐增大时, 填充因数也逐渐增大, 但在界面缺陷大于 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时, 填充因数增大至一定稳定范围, 如图 5(c)所示。图 5(d)描述的是转换效率与界面缺陷的关系, 其与电压的变化趋势类似但又有所不同。当界面缺陷增大, 转换效率迅速减小, 当界面缺陷大于 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, 转换效率的减小趋势相对变小, 始终呈减小趋势。因此从图 5 计算可以看出, 界面缺陷对钙钛矿太阳能电池的性能也有显著影响, 当界面缺陷为 $1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 范围时, 开路电压、电流密度、填充因数和转换效率这四个重要参数最佳。

3.3. CuSCN 受主掺杂浓度(N_A)对器件性能的影响

受主掺杂浓度对空穴传输层的光电性能具有显著影响, 进而影响到钙钛矿太阳能电池的性能。受主掺杂浓度对钙钛矿太阳能电池的影响主要体现在器件的光电转换效率和稳定性上。最重要的一点就是当受主掺杂浓度相比之前有增加的情况, 它是能够有效地减少电子和空穴的复合概率的, 通过这种方式来提高电池的性能和效率, 其中最显著的就是电池的开路电压和短路电流。其次, 合适的受主浓度还可以有助于维持钙钛矿薄膜的结晶性和完整性, 从而提高电池的稳定性。但受主浓度太高会导致载流子迁移率降低和载流子复合增加, 这都对提高电池的效率没有帮助。因此, 选择合适的受主浓度是制备高性能钙钛矿太阳能电池的关键因素。

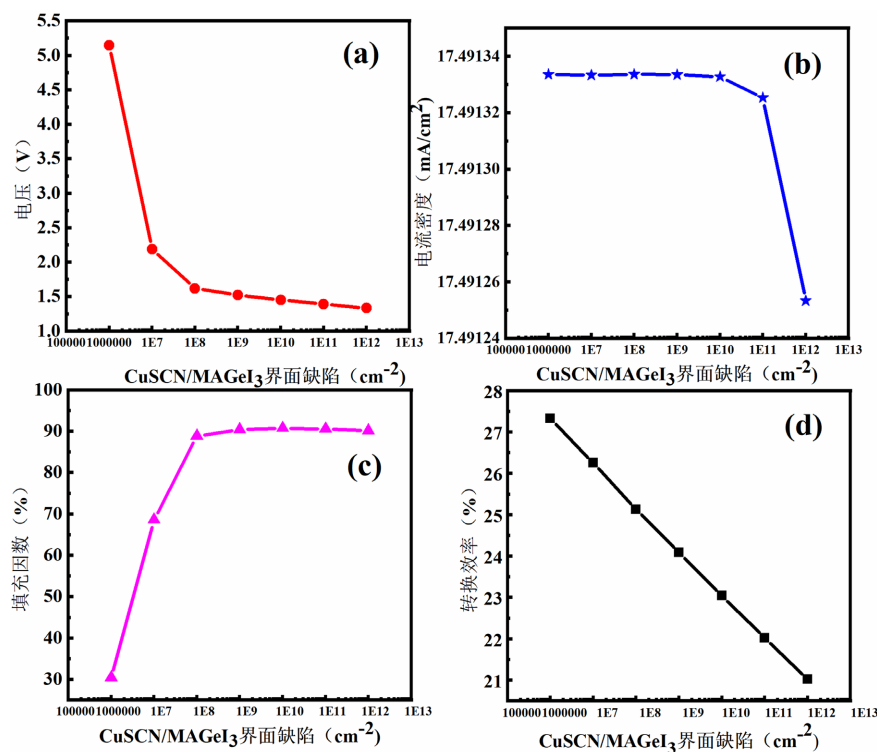


Figure 5. (a) Open-circuit voltage; (b) current density; (c) filling factor; (d) power conversion efficiency with interface defects
图 5. (a) 开路电压; (b) 电流密度; (c) 填充因数; (d) 光电转换效率随界面缺陷的变化曲线

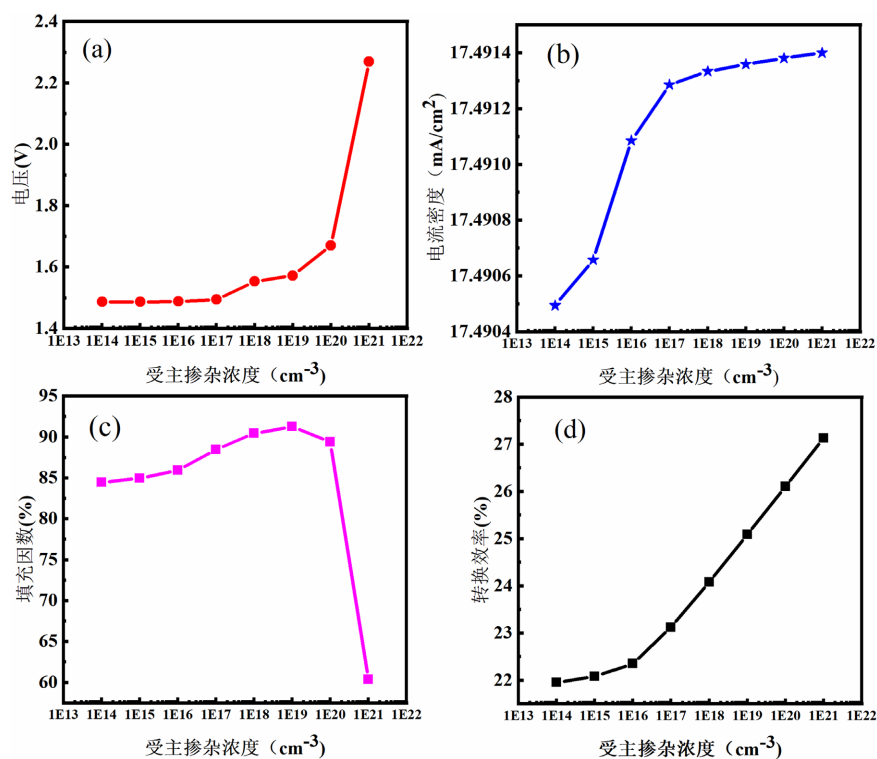


Figure 6. (a) Open-circuit voltage; (b) current density; (c) filling factor; (d) power conversion efficiency with acceptor doping concentration
图 6. (a) 开路电压; (b) 电流密度; (c) 填充因数; (d) 光电转换效率随受主掺杂浓度的变化曲线

因此研究了受主参杂浓度(N_A)对器件性能的影响, 计算过程中受主参杂浓度(N_A)变化范围为 $1 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, 开路电压、电流密度、填充因数和转换效率随着受主参杂浓度的变化如图 6 所示。由图 6 可以看出, 钙钛矿太阳能电池的开路电压、电流密度、填充因数和转化效率随着掺杂浓度的增大呈同步增大趋势, 而当掺杂浓度在 $1 \times 10^{20} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 范围时, 电压急速增大而填充因数呈相反趋势, 在此范围急速减小。综合观察四个图发现, 在掺杂浓度 $N_A = 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的情况下, 电池的性能达到最佳水平, 开路电压为 1.67 V, 电流密度为 17.49 mA/cm^2 , 填充因数为 89.37%, 转换效率为 26.10%。

3.4. 温度对电池性能的影响

温度对钙钛矿太阳能电池的性能具有一定的影响, 主要表现在以下两个方面: 首先, 钙钛矿材料的吸光性能和电荷传输性能受温度影响较大, 这会导致电池的短路电流、开路电压等关键参数发生变化。其次, 钙钛矿电池的稳定性可能会受到多方面因素的干扰, 其中最影响其性能稳定性的就是温度的大小。因此, 在使用钙钛矿太阳能电池时, 应充分考虑温度对其性能和稳定性的影响, 并采取相应的措施以优化其工作性能和稳定性。

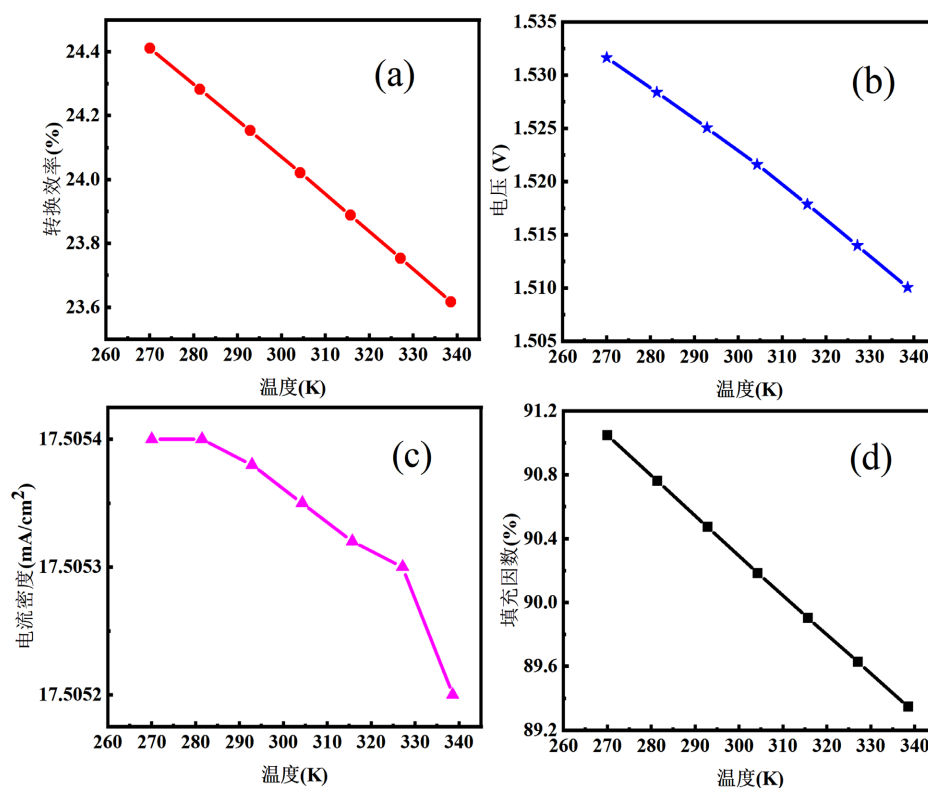


Figure 7. (a) Power conversion efficiency; (b) open circuit voltage; (c) current density; (d) filling factor curve with temperature
图 7. (a) 光电转换效率; (b) 开路电压; (c) 电流密度; (d) 填充因数随温度的变化曲线

为研究温度对钙钛矿太阳能电池的具体影响, 设置温度范围为 260~340 K 进行了计算。图 7 是开路电压, 电流密度, 填充因数和光电转换效率随温度的变化关系。从图 7 可以看出开路电压, 短路电流密度, 填充因数和光电转换效率均随着温度的升高而减小。这是因为当温度升高时, 特别是在高温环境下, 钙钛矿材料的晶格结构容易发生改变, 导致其吸光性能和电荷传输性能显著降低, 进而影响电池的效率。在高温环境下, 钙钛矿材料极其不稳定, 很容易发生分解等现象, 这就会导致钙钛矿太阳能电池的性能会迅速衰减, 不利于商业的应用, 因此, 温度 $T=270 \text{ K}$ 时, 开路电压为 1.53 V, 电流密度为 17.51 mA/cm^2 ,

填充因数为 91.05%，转换效率为 24.41%。

基于以上几方面对钙钛矿太阳能电池性能的仔细研究，获得了优化后的各个参数设置，优化后的钙钛矿太阳能电池转换效率为 33.82%，相比初始参数下的光电转换效率 24.07%，提高了 9.75%。如图 8 所示。

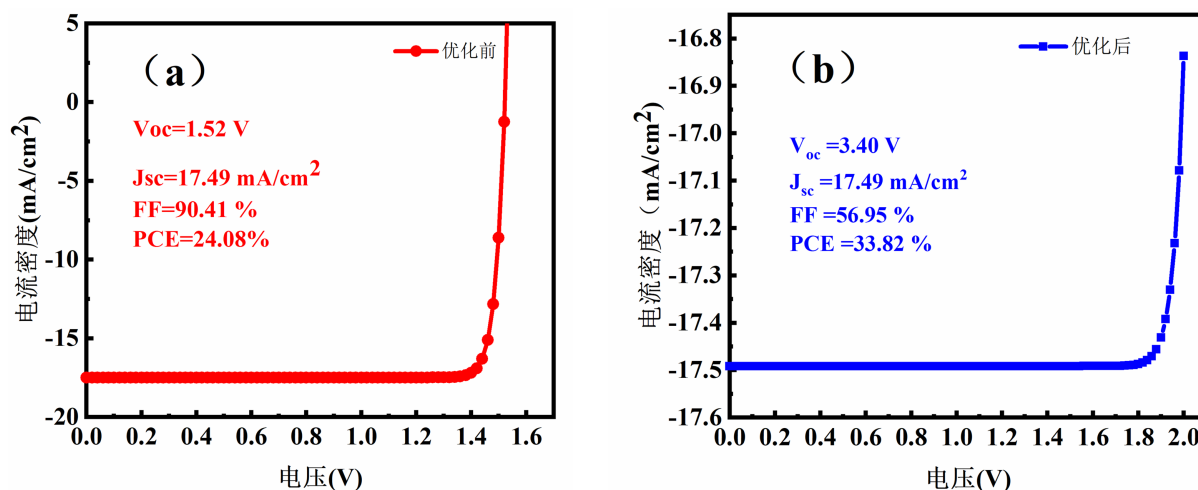


Figure 8. (a) The performance of the unoptimized device; (b) the optimized device

图 8. (a) 未优化器件的性能; (b) 优化后器件性能

4. 结论

利用 Scaps-1d 软件构建了结构为 ITO/TiO₂/MAGeI₃/CuSCN/Au 钙钛矿太阳能电池，研究表明空穴传输层的带隙、受主掺杂浓度、钙钛矿吸收层的缺陷态密度，以及 MAGeI₃/CuSCN 界面缺陷等参数对钙钛矿太阳能电池的性能具有重要的影响。通过优化，钙钛矿太阳能电池的光电转换效率为 33.83%，为制备高性能的光伏器件提供了理论支持。

基金项目

大学生创新创业训练课题(S202310666066)，黔西南州科技局项目(州科合基础 2024-6)；兴义民族师范学院重大项目(21XYZD09)；兴义民族师范学院博士基金(23XYBS17)；兴义民族师范学院“千”层次人才项目(24XYRC05)。

参考文献

- [1] 赵世欣. 基于国内专利的钙钛矿太阳能电池发展趋势[J]. 中国科技信息, 2024(3): 30-32.
- [2] Deepthi Jayan, K. and Sebastian, V. (2021) Comprehensive Device Modelling and Performance Analysis of MASnI₃ Based Perovskite Solar Cells with Diverse ETM, HTM and Back Metal Contacts. *Solar Energy*, **217**, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.058>
- [3] Devi, C. and Mehra, R. (2019) Device Simulation of Lead-Free MASnI₃ Solar Cell with CuSbS₂ (Copper Antimony Sulfide). *Journal of Materials Science*, **54**, 5615-5624. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03265-y>
- [4] Lakhdar, N. and Hima, A. (2020) Electron Transport Material Effect on Performance of Perovskite Solar Cells Based on CH₃NH₃GeI₃. *Optical Materials*, **99**, 109517. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109517>
- [5] Bhattarai, S. and Das, T.D. (2021) Optimization of Carrier Transport Materials for the Performance Enhancement of the MAGeI₃ Based Perovskite Solar Cell. *Solar Energy*, **217**, 200-207. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.002>
- [6] Jayan K., D. and Sebastian, V. (2021) Comparative Study on the Performance of Different Lead-Based and Lead-Free Perovskite Solar Cells. *Advanced Theory and Simulations*, **4**, Article ID: 2100027.

- <https://doi.org/10.1002/adts.202100027>
- [7] Sarker, S., Islam, M.T., Rauf, A., Al Jame, H., Jani, M.R., Ahsan, S., *et al.* (2021) A SCAPS Simulation Investigation of Non-Toxic MAGeI_3 -on-Si Tandem Solar Device Utilizing Monolithically Integrated (2-T) and Mechanically Stacked (4-T) Configurations. *Solar Energy*, **225**, 471-485. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.057>
- [8] Li, K., Wang, S., Chen, C., Kondrotas, R., Hu, M., Lu, S., *et al.* (2019) 7.5% n-i-p Sb_2Se_3 Solar Cells with CuSCN as a Hole-Transport Layer. *Journal of Materials Chemistry A*, **7**, 9665-9672. <https://doi.org/10.1039/c9ta01773a>
- [9] Hou, S., Shi, B., Wang, P., Li, Y., Zhang, J., Chen, P., *et al.* (2020) Highly Efficient Bifacial Semitransparent Perovskite Solar Cells Based on Molecular Doping of CuSCN Hole Transport Layer. *Chinese Physics B*, **29**, Article ID: 078801. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ab99ae>
- [10] 王茹, 龚志明, 姜月, 等. 钙钛矿太阳能电池及其空穴传输研究综述[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(5): 703-717.
- [11] Mahapatra, B., Krishna, R.V. and Patel, P.K. (2022) Design and Optimization of CuSCN/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$ Perovskite Solar Cell for Efficient Performance. *Optics Communications*, **504**, Article ID: 127496.
- [12] Sahoo, D. and Manik, N.B. (2022) Study on the Effect of Temperature on Electrical and Photovoltaic Parameters of Lead-Free Tin-Based Perovskite Solar Cell. *Indian Journal of Physics*, **97**, 447-455. <https://doi.org/10.1007/s12648-022-02401-4>