

半透明钙钛矿太阳能电池的光物理特性调控

刘梦瑶 陈伟伟 周鹏飞 吴航娟 马俊杰

Regulation of optical physical properties of semitransparent perovskite solar cells

LIU Mengyao, CHEN Weiwei, ZHOU Pengfei, WU Hangjuan, MA Junjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240620.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铅卤钙钛矿太阳能电池界面工程的近期进展

Recent progress of interface engineering for lead halide perovskite solar cells

复合材料学报. 2022, 39(5): 1937–1955 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220303.001>

高效率双结钙钛矿叠层太阳能电池研究进展

Research progress of high-efficiency double-junction perovskite tandem solar cells

复合材料学报. 2023, 40(2): 726–740 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220923.002>

转移法制备顶电极在钙钛矿太阳能电池中的应用

Application of transferred top electrode in perovskite solar cells

复合材料学报. 2022, 39(5): 1924–1936 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211215.001>

二维卤化物钙钛矿太阳能电池稳定性和效率的研究进展

Research progress on the stability and efficiency of the two-dimensional halide perovskite solar cells

复合材料学报. 2022, 39(5): 1890–1906 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211118.001>

Cu_xO 用于调控全无机碳基 CsPbI_2Br 钙钛矿太阳能电池的界面性能

Improved interface performance of all inorganic carbon based CsPbI_2Br perovskite solar cells using Cu_xO

复合材料学报. 2023, 40(5): 2818–2826 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221213.002>

倒置结构全无机钙钛矿太阳能电池的界面层研究进展

Recent progress of interfacial layers for inverted inorganic perovskite solar cells

复合材料学报. 2022, 39(5): 1859–1869 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220120.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

半透明钙钛矿太阳能电池的光物理特性调控



分享本文

刘梦瑶¹, 陈伟伟¹, 周鹏飞¹, 吴航娟², 马俊杰^{*1}

(1. 郑州大学 河南先进技术研究院, 郑州 450052; 2. 西安交通大学 化学学院, 西安 710072)

摘要: 宽带隙半透明钙钛矿太阳能电池具有优异的光电性能高和光学透过率等特点, 使其在光伏建筑一体化、叠层器件、可穿戴电子设备等领域有独特的应用优势。然而, 由于光敏层带隙吸收损耗、功能层界面反射、电极折射率失配等原因, 限制了光子在器件内部的吸收和转换, 进而造成光学能量损耗, 降低了光利用率。为了提升半透明钙钛矿太阳能电池的性能, 需要深入研究光物理特性和光子传输路径, 提高光电能量转换效率。本文针对半透明钙钛矿太阳能电池光物理特性的相关机制和调控策略进行系统性总结。首先, 围绕光子的传播路径进行理论分析。然后, 对围绕减缓光学损耗的光管理策略展开讨论。最后, 对半透明钙钛矿太阳能电池当前的应用挑战和未来的发展研究方向进行了展望。

关键词: 半透明钙钛矿太阳能电池; 光物理特性; 光子传输管理; 光学损耗; 光电能量转换效率

中图分类号: TM914.4; TB333

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2025)10-5485-14

Regulation of optical physical properties of semitransparent perovskite solar cells

LIU Mengyao¹, CHEN Weiwei¹, ZHOU Pengfei¹, WU Hangjuan², MA Junjie^{*1}

(1. Henan Institute of Advanced Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;

2. School of Chemistry, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Band-gap semitransparent perovskite solar cells have excellent photoelectric performance and optical transmittance, which makes them have unique application advantages in photovoltaic building integration, laminated devices, wearable electronic devices and other fields. However, due to the band gap absorption loss of the photosensitive layer, the interface reflection of the functional layer, and the mismatch of the electrode refractive index, the absorption and conversion of photons in the device are limited, resulting in optical energy loss and reduced light utilization. In order to improve the performance of semitransparent perovskite solar cells, it is necessary to deeply study the photophysical characteristics and photon transmission path to improve the photoelectric conversion efficiency. In this paper, the relevant mechanisms and regulatory strategies of photophysical properties of semitransparent perovskite solar cells are systematically summarized. Firstly, the propagation path of photon is analyzed theoretically. Then, the light management strategy around reducing optical loss is discussed. Finally, the current application challenges and future research directions of translucent perovskite solar cells are prospected.

Keywords: semitransparent perovskite solar cells; photophysical properties; photon transmission management; optical loss; photoelectric conversion efficiency

太阳能储量丰富、清洁环保、是一种可持续能源, 被认为是未来替代化石燃料的主要新能源之一。近年来, 新兴的钙钛矿太阳能电池由于效率高、易于加工和成本低等特点而受到广泛的关

注^[1-5]。并且钙钛矿材料还具有优异的光电性能, 如高吸收系^[6]、高载流子迁移率^[7]和较长的电荷扩散长度等^[8-9], 因此钙钛矿太阳电池 (Perovskite solar cells, PSCs) 发展迅猛, 到目前为止, 其光

收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-05-10; 录用日期: 2024-06-11; 网络首发时间: 2024-06-21 12:45:17

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240620.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (62104216)

National Natural Science Foundation of China (62104216)

通信作者: 马俊杰, 博士, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为新能源材料与半导体器件相关的工作; 基于同步辐射掠入射 X 射线散射 (GIXS) 技术, 研究光电薄膜中纳米尺度的微观结构和分子取向 E-mail: junjiema@zzu.edu.cn

引用格式: 刘梦瑶, 陈伟伟, 周鹏飞, 等. 半透明钙钛矿太阳能电池的光物理特性调控 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(10): 5485-5498.

LIU Mengyao, CHEN Weiwei, ZHOU Pengfei, et al. Regulation of optical physical properties of semitransparent perovskite solar cells[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(10): 5485-5498(in Chinese).

电转换效率已经从 3.8% 飙升至 26.1%^[10]。

更重要的是，PSCs 具有带隙可调、钙钛矿薄膜厚度可控等特点，结合使用透明电极，制备半透明钙钛矿太阳能电池 (Semitransparent perovskite solar cells, ST-PSCs)，可实现器件透明化^[11-12]。ST-PSCs 可以与建筑物有机结合，使建筑物成为分布式供电单元，降低能源成本。利用 ST-PSCs 本征色彩性，可进一步提高建筑物的美观度，从而实现光伏建筑一体化 (Building-integrated photovoltaics, BIPV)。并且通过将 ST-PSCs 与窄带隙电池相结合，可制备叠层光伏器件，助力突破单节电池光电转换效率限制 (Shockley-Queisser, SQ)^[13]。

ST-PSCs 的性能评估涉及两个关键参数，光电转换效率 (Photoelectric conversion efficiency, PCE) 和平均可见光透射率 (Average visible transmittance, AVT)。由于近红外波段光子的弱吸收性、近紫外波段光子的热损失性，以及可见光波段的光子的强反射性等原因，器件对于入射光子能量无法实现高效利用，从而制约器件的光伏性能。

因此，对于 ST-PSCs 来说，目前的关键是减少光学能量损耗、提高光子吸收、降低光子反射率，提高光利用率 (Light use efficiency, LUE=PCE×AVT)。所以，深入了解 ST-PSCs 的光物理特性、优化光子传播管理措施，对于推动高性能 ST-PSCs 的发展和应用至关重要。

1 光物理特性理论机制

从光物理特性理论机制方面系统地解释 ST-PSCs 的工作原理及光子传输机制对于持续优化器件光电性能十分关键。因此，本章对 ST-PSCs 的光子传输机制进行了理论分析，为降低 ST-PSCs 的光学能量损耗提供理论指导。

1.1 吸收特性

根据波粒二象性原理，光波可以被看作粒子，粒子又被称为光子。在光与半导体介质相互作用的过程中，光子是否能被半导体吸收，取决于光子能量 ($E = h\nu$) 和被照射的半导体的带隙能量 (E_g)。当光子能量小于带隙能量 ($E = h\nu < E_g$) 时，光子无法被吸收，在这种情况下，光子将透射半导体材料，增加器件的透明度。相反，如果光子能量大于等于带隙能量 ($E = h\nu \geq E_g$)，光子将被半导体材料吸收，并且与价电子相互作用，激发电子跃迁到导带上产生电子-空穴对。

光强度 $I(x)$ 与吸收系数 α 的关系由下式表示

$$I(x) = I_0e^{-\alpha x} \tag{1}$$

其中： I_0 是入射光强度； x 是半导体介质的厚度。

钙钛矿材料在可见光范围内具有较高的吸收系数 ($\approx 10^5 \text{ cm}^{-1}$)，即厚度为 500 nm 的钙钛矿膜可以吸收大部分可见光。同时，钙钛矿材料的带隙也决定着它的吸收系数。例如，带隙为 1.5 eV 的钙钛矿能够实现全可见光的范围 (380~780 nm) 内的光学吸收^[14]，而带隙为 2.3 eV 的钙钛矿的吸光范围为 (500~600 nm)^[15]。此外钙钛矿的光吸收系数会影响短路电流密度 (J_{sc})，进而影响器件 PCE。因此，如何提高光吸收能力是提高 ST-PSCs 性能的关键。

1.2 反射特性

由于两种介质具有不同的折射率，在空气和 PSCs 基板界面处不可避免地会发生菲涅耳反射，光不能完全被吸收利用，进而导致光学损耗。反射率 (R) 定义为反射能通量密度与入射能通量密度之比，可用下式表示

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \tag{2}$$

其中， n_1 和 n_2 是指两种介质的折射率。据报道，由于反射率失配，玻璃和空气界面处的光反射约占光学损耗的 30%^[16]。因此，通过在玻璃基板和空气之间附着界面改性层或抗反射 (AR) 层可以在一定程度上减轻反射损失。

入射光强度 I_0 、光强度 I 、反射率 R 之间的关系如图 1 所示。

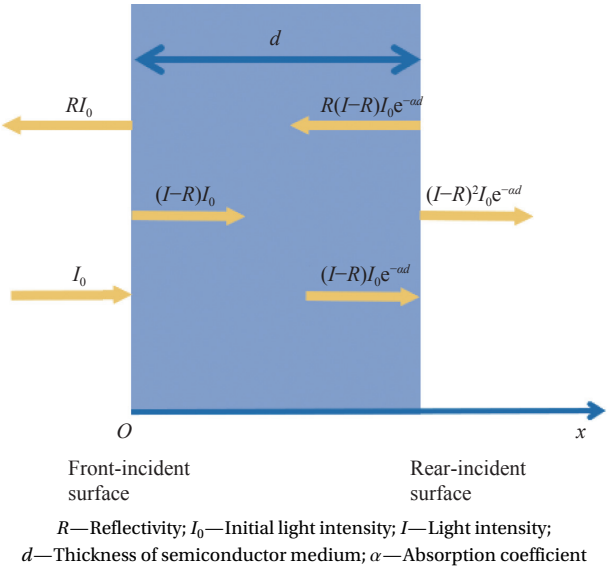


图 1 反射透射图

Fig. 1 Reflection transmission diagram

1.3 透射特性

透射率 (T) 被定义为入射光的强度 (I_0) 与穿过物体的光强度 $I(d)$ 的比率。对于具有均匀厚度 d 和均匀吸收系数 α 的物体, 如果只考虑一次透射, 入射光在后界面的透射率可表示为下式:

$$T = \frac{I(d)}{I_0} = (I - R)^2 e^{-\alpha x} \tag{3}$$

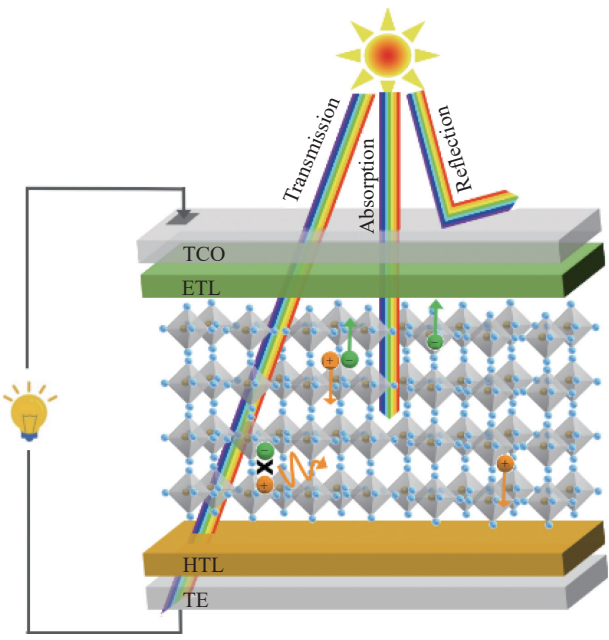
对于 ST-PSCs, 可以通过控制厚度、调整带隙和优化钙钛矿结构来调节 T 值。此外, 每个功能层之间的折射率耦合也会影响整体透光率。考虑到可见波长范围内的光谱响应, AVT 可以进一步通过下式^[17-18]来计算:

$$AVT = \frac{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} T(\lambda) P(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} P(\lambda) S(\lambda) d\lambda} \tag{4}$$

其中: λ 是波长; T 是透射率; P 反映人眼对可见光的响应; S 是 AM1.5 G 光照明下的太阳光子通量。根据能量守恒原理, 吸收率 (A)、反射率 (R) 和透射率 (T) 的关系可以推导为下式:

$$A + R + T = 1 \tag{5}$$

ST-PSCs 中的光子传输路径如图 2 所示。为了获得最佳性能, 需要在确保透明度的前提下, 调节光子的传播路径以增强光吸收, 减少光反射,



TCO—Transparent conductive oxide; ETL—Electronic transmission layer; HTL—Hole transport layer; TE—Transparent electrode
图 2 半透明钙钛矿太阳能电池 (ST-PSCs) 中的光传输路径示意图
Fig. 2 Schematic diagram of light transmission path on semitransparent perovskite solar cells (ST-PSCs)

进一步提升器件性能。

2 吸收调控

ST-PSCs 的性能关键受制于其对太阳光的吸收效率, 所以对光吸收进行调控已成为提升电池性能的重要策略之一。为了能最大程度地利用太阳光, 研究者们正在积极探索各种调控手段, 其中包括本征带隙调控、光谱转换调控以及局域光场调控。这些措施不仅能够调节材料的电子结构, 还直接影响材料的光学物理特性。其调控光的吸收、散射、透射等过程, 为 ST-PSCs 提供更广的吸收光谱范围、更高的吸收效率以及更强的光电转换效果。笔者期望通过吸收调控手段, 为 PSCs 的性能优化开辟更为有效的途径。

2.1 本征带隙调控

钙钛矿材料的光谱吸收范围与其自身的带隙密切相关。目前对钙钛矿材料的带隙调控一般采用离子掺杂的方式。

Johnston 课题组^[19]采用甲醚离子 ($\text{CH}(\text{NH}_2)_2^+$, FA^+) 去替换离子半径更小的甲胺离子 (CH_3NH_3^+ , MA^+), 经研究发现 FAPbI_3 带隙为 1.47 eV, 相较于 MA 基的钙钛矿材料其带隙变窄, 吸收光谱变宽, 光谱吸收范围拓宽至 843 nm 的近红外区, 可制备出 PCE 为 4.3% 的器件, 但是其湿度稳定性较差。研究者进一步在 FA 基的钙钛矿材料中掺杂 MA、Cs 等离子, 显著改善了其相稳定性, 使其 PCE 超过了 20%。同样在金属阳离子 (B 离子) 位上用 Sn 取代 Pb, 也能起到调节带隙的作用。Sn 基钙钛矿材料中 CsSnI_3 和 MASnI_3 具有相对窄的带隙, 从而被广泛用于研究。基于此, Dericioglu 课题组^[20]报道了 PCE 为 6.4% 的 Sn 基钙钛矿电池, 值得注意的是, MASnI_3 材料的带隙为 1.23 eV, 吸收光谱范围拓宽至 1 000 nm, 图 3 为 Sn 基钙钛矿电池基础结构。张美荣等^[21]用 Sn 部分取代 Pb 制备出了高质量的薄膜, 该薄膜材料相比于全 Pb 基薄膜, 其吸收光谱从 800 nm 拓宽至 900 nm, 获得了 PCE 为 10.1% 的器件。因此, 通过离子掺杂可以实现对薄膜材料带隙的精细调控, 进而能够拓宽材料的吸收光谱。

2.2 光谱转换调控

通常, 钙钛矿薄膜仅能有效地利用可见光范围内的阳光, 存在光谱失配问题, 使得低能光子和高能光子都不能被有效利用。如何有效地利用太阳光谱紫外和红外波段的光谱能量是 ST-PSCs

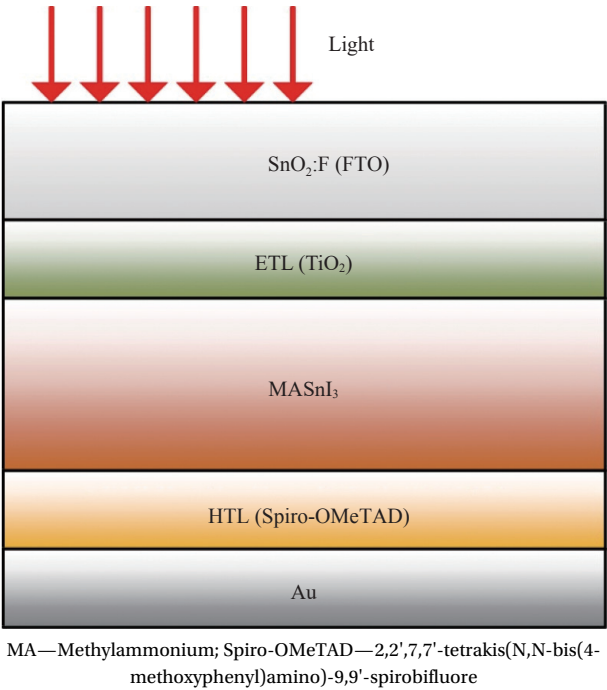


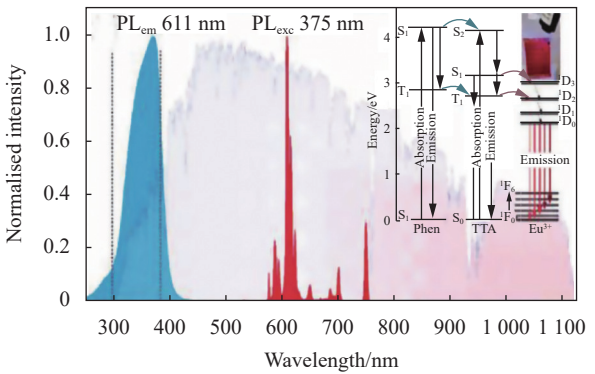
图3 Sn基钙钛矿电池基础结构

Fig. 3 Basic structure of Sn-based perovskite solar cells

光利用的重要方向。通过引入光转换材料，可以实现太阳光谱的量子积分和切割，从而更好地利用红外光和紫外光。

上转换 (Upconversion, UC) 和下转换 (Downconversion, DC) 材料可将红外光和紫外光转换成可被钙钛矿有效利用的光子能量，以此方式，实现扩宽光谱响应范围的目的。光的 UC 过程是一种反 Stokes 效应，其原理是发光材料中的活性物质吸收了两个或更多低能量波长的激发态光子然后辐射出能量更高的短波长光子^[22]。DC 材料可以将钙钛矿的光谱响应范围拓宽至紫外区。Rai 等^[23]在透明玻璃基板的背面涂覆一层 Eu 离子掺杂的二噻吩甲酰三氟丙酮-菲罗啉 (TTA-Phen) 配合物作为 DC 材料。如图 4 所示，这种 DC 材料可以吸收 250~410 nm 的光，并且激发光在 610 nm 处出现发射峰。该种光子收集材料补偿了钙钛矿的光吸收不足带来的光损耗并显著增强光转换能力，同时还抑制了紫外诱导的降解。在优化之后，面积为 21 cm² 的 ST-PSCs 可表现出 9.5% 的 PCE 和大于 20% 的 AVT。

如果 UC 和 DC 同时施加，可以将近红外和紫外光同时利用，进一步实现光吸收最大化。Kim 等^[24]开发了一种具有双发光太阳能聚光器 (LSC) 的光伏器件结构，该结构以 UC 材料和降频



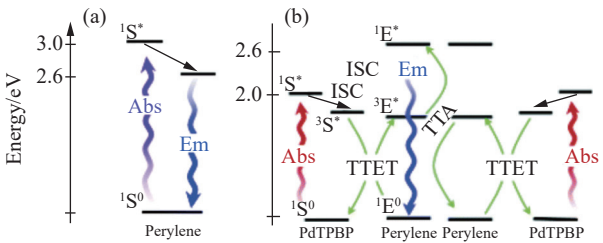
PL_{em}—Photoluminescence emission; PL_{exc}—Photoluminescence excitation; TTA—Riplet-triplet annihilation; S₀, S₁, S₂—Singlet ground state, first singlet excited state, second singlet excited state; T₁—Triplet state; ¹F₀, ¹F₆—Ground and excited state of europium ion; ¹D₀, ¹D₁, ¹D₂, ¹D₃—The 0th, 1st, 2nd, and 3rd energy level of the excited states of the europium ion

图4 Eu 配合物的光致发光图谱 (其在室内光下为白色，在紫外光下为红色，背景显示了归一化的太阳辐照度。经许可转载)^[23]

Fig. 4 Photoluminescence excitation and emission of Eu complex (White in room light and red-emitting under UV, background shows the normalized solar irradiance. Reproduced with permission)^[23]

(Downshift, DS) 材料为辅助材料，获得具有宽带响应的 ST-PSCs。作为 DC 机制之一的 DS 可以吸收短波长光子并发射长波长光子，图 5(a)、图 5(b) 为 DS、UC 工艺的能量图。通过将荧光染料分子浸入聚氨酯中制备了含有 DS 和 UC 材料的固体膜。如图 6(a)、图 6(b) 所示，DS 转换器吸收紫外光 (375~450 nm) 并通过振动弛豫辐射蓝光 (450~550 nm)。UC 转换器吸收红光并且也发射蓝光。其中荧光染料的浓度和 LSC 面板的厚度将影响发光强度。在优化各种参数之后，双 LSC 半透明钙钛矿太阳能电池的不仅实现了高 PCE (7.53%)，而且还表现出 82% 的优异 AVT。

然而，半透明钙钛矿太阳能电池的相关研究



Abs—Absorption; Em—Emission; TTET—Triplet-triplet energy transfer; TTA—Triplet-triplet annihilation; ISC—Intersystem crossing; PdTPBP—Palladium(II) tetraphenylporphyrin; ¹S₀, ¹S₁, ³S₁—Singlet ground state, singlet excited state, triplet excited state; ¹E₀, ¹E₁, ³E₁—Singlet ground state, singlet excited state, triplet excited state

图5 (a) 降频 (DS) 工艺能量图; (b) 上转换 (UC) 工艺能量图 (经许可转载)^[24]

Fig. 5 (a) Energy diagrams of downshift (DS); (b) Energy diagrams of upconversion (UC) process (Reproduced with permission)^[24]

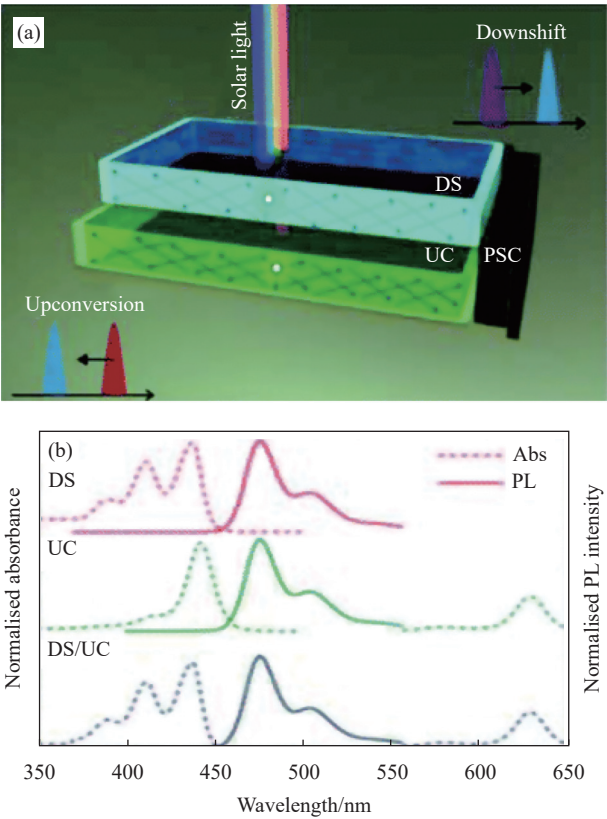


图6 (a) 双面板发光太阳能聚光器 (LSC)-光伏系统 (PV) 的操作示意图; (b) DS、UC 和双 DS/UC 板的吸光度和 PL 发射光谱 (经许可转载)^[24]

Fig. 6 (a) Schematic diagram for the operation of a dual-panel luminescent solar concentrator (LSC)-based photovoltaic systems (PVs); (b) Absorbance and PL emission spectra of the DS, UC, and dual DS/UC panels, respectively (Reproduced with permission)^[24]

仍处于起步阶段。对于未来的研究，还需要开发更有效的 UC 和 DC 材料。

2.3 局域光场调控

表面等离子体激元 (Surface plasmon, SP) 通过等离子体共振机制增强光吸收的措施已经应用于硅和有机太阳能电池^[25]。近年来，SP 也已被广泛用于 ST-PSCs，用来实现提高 PCE 的目的。

离子体共振机制通过设计特定纳米结构来实现，当太阳光照射到这些结构上时，金属纳米结构表面的自由电子开始共振振荡，形成表面等离子体共振^[26]。这种耦合效应使得电子在金属结构表面形成周期性的电荷密度波动，产生局域电磁场的增强，如图 7(a)、图 7(b) 所示。该局域电磁场的增强不但可以提高光的吸收效率，光生载流子密度，并且可以促使电荷分离和电流产生，进一步优化器件性能。

银纳米粒子 (Silver nanoparticles, AgNPs) 具有较强的近场增强和远场散射特性，其一般在

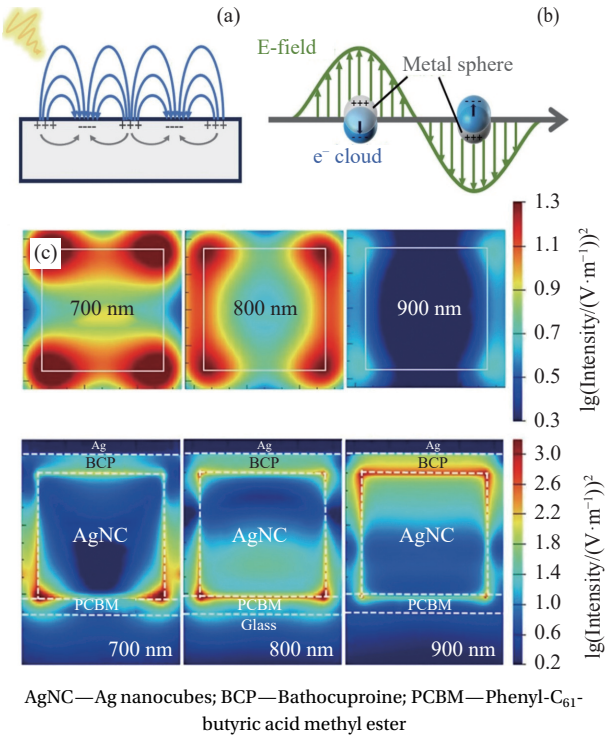


图7 ((a),(b)) 等离子体现象示意图; (c) 通过 FDTD 方法计算的等离子体电场的横向 (在 PCBM-玻璃界面处) 和垂直分布 (根据知识共享署名 CC-BY 许可条款复制)^[28]

Fig. 7 ((a),(b)) Schematic diagram of surface plasmon phenomenon; (c) Lateral (at the PCBM-glass interface) and vertical distributions of the plasmonic electric field calculated by the FDTD method (Reproduced under the terms of a creative commons attribution CC-BY license)^[28]

700~800 nm 范围内表现出较强的电场增强效应。Rahman 等^[27] 用数值模拟研究了 AgNPs 存在下 ST-PSCs 的光学性能，发现 AgNPs 可以通过局部场增强和局域表面等离子体共振的远场散射来增强光吸收。Kim 等^[28] 进一步通过实验证明 AgNPs 应用于器件会表现出等离子体增强光吸收的效应。如图 7(c) 所示，AgNPs 在 700~800 nm 处有场增强效应，其将保持强电场，并使电场集中在电极底部，电极耦合等离子体激元可以使 ST-PSCs 捕获近红外范围和人类不敏感范围的光，并调节 ST-PSCs 内的 AVT 和光吸收。虽然 AgNPs 具有实现等离子体增强光吸收的许多优点，但材料成本较高，且 Ag 不利于钙钛矿的稳定性。幸运的是，研究人员发现低成本的铜纳米颗粒 (Copper nanoparticles, CuNPs) 也可以提供优异的等离子体近场增强效应。并且其较高的化学稳定性也有利于 ST-PSCs 的长期稳定性。Rahman 等^[29] 模拟了在太阳能器件中 CuNPs 对光吸收和透明度的影响。模拟结果表明，随着纳米颗粒尺寸的增大，纳米颗粒周围的电场

强度减小。CuNPs 的引入使 ST-PSCs 在 500~700 nm 的范围内表现出较强的等离子体增强光吸收效应。低成本的 CuNPs 等离子体材料的出现，促进了等离子体激元增强光吸收的普遍应用。另一方面，介电颗粒和二聚体颗粒也是一种有前途的等离子体材料。早在 2018 年，Jiménez-Solano 等^[30]表明，嵌入在 MAPbI₃ 膜的硅颗粒会发生本地共振从而导致光吸收增强。

作为 ST-PSCs 的有效增强光吸收材料，等离子体纳米粒子仍需进一步探索。其他低成本和高耦合等离子体材料也值得继续研究。

3 反射调控

入射光的利用不可避免地受到空气-基底界面处菲涅耳反射的限制，光损耗的主要原因之一是大量的光子被反射。因此开发高效的光学减反射技术对进一步提高器件 PCE 有着非常重要的意义。目前，常用的光学减反射技术包括构筑 AR 层、平面减反薄膜和微结构减反薄膜。

3.1 AR 层

AR 层作为一种光学介质膜，可以利用相干性原理调节薄膜的折射率，从而优化 ST-PSCs 的光传输路径。引入 AR 膜，可通过调节光子传输路径来减轻反射、降低能量损失和增强光吸收，这将同时提高入射光速率和光透射率。

首先，Jung 研究小组^[31]将 LiF 作为 AR 层应用于 ST-PSCs 中，研究表明，LiF 的引入显著减少了镜面反射引起的能量损失，增加了 ST-PSCs 的透明度，同时提高了器件的 J_{SC}。接着 Bush 等^[32]通过热蒸发制备 LiF AR 涂层，将其与 Si 半透明钙钛矿太阳能电池耦合，获得了 23.6% 的串联效率和优异的稳定性。但是，LiF 的力学性能较差，因而不适合应用在柔性电子器件中，并且其具有吸湿性，不利于器件的长期稳定性。MgF₂ 是一种双折射晶体，折射率为 1.38。除了具备高硬度和良好的力学性能外，它还在宽光谱范围 (120~750 nm) 内显示出惊人的透过率。因此，MgF₂ 在降低 ST-PSCs 的光反射方面表现出了非凡的潜力，是一种非常合适的 AR 层材料。Gharibzadeh 小组^[33]采用热蒸发法在 ITO 层的顶部沉积 MgF₂，并采用正丁基溴化铵大分子对三维 (3D) 钙钛矿膜进行表面处理，实现了 3D/平面 (2D) 钙钛矿结构和高 PCE，如图 8 所示。研究发现 MgF₂ 可以显著增加 2D 钙钛矿的平均透射率，从而改善 ST-PSCs 的

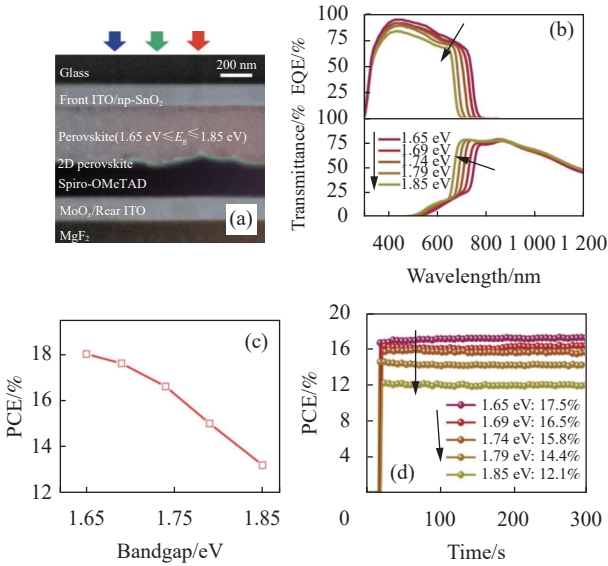


图 8 (a) 具有 2D/3D 钙钛矿异质结构的 ST-PSCs 的横截面 SEM 图像 (光从顶部进入); (b) 具有 2D/3D 异质结构和工程化带隙 (1.65 eV ≤ E_g ≤ 1.85 eV) 的非透明 PSC 的外量子效率 (EQE) 和透射率; 在 1 个太阳 (AM 1.5G) 光照下，具有 2D/3D 异质结构的半透明钙钛矿太阳能电池在对应带隙下的光伏参数反向扫描的光电转换效率图 (PCE) (c) 和电流-电压 (J-V) 曲线图 (d) (经许可转载)^[33]

Fig. 8 (a) Cross-sectional SEM image of the ST-PSCs with 2D/3D perovskite hetero structure (Light enters from the top); (b) External quantum efficiency (EQE) and transmittance of non-transparent-PSC with 2D/3D heterostructure and engineered bandgap (1.65 eV ≤ E_g ≤ 1.85 eV); Statistics of the photovoltaic parameters for ST-PSCs with 2D/3D heterostructure under 1 sun AM 1.5G illumination power conversion efficiency (PCE) in the reverse scan direction as a function of the perovskite bandgap (c) and the current-voltage (J-V) curves (d) (Reproduced with permission)^[33]

总体 AVT。基于这些启示，Sahli 等^[34]在双面织构硅太阳能电池中引入 MgF₂ 作为 AR 层，在引入 MgF₂ 之后，钙钛矿/硅异质结叠层太阳能电池 (Tandem solar cell, TSC) 的总反射率显著降低，表现出令人鼓舞的 PCE (25.2%)。除了无机材料之外，研究人员还探索了一些有机材料作为 AR 层以减少光反射。例如透明导电聚合物 (聚 (3,4 乙基二氧噻吩): 聚 (苯乙烯磺酸盐) (PEDOT : PSS)) 作为顶部电极和 AR 层，如图 9(a)、图 9(b) 所示^[35]。在可见光谱范围内，其颜色调节特征可以改变 ST-PSCs 在电极、传输层和钙钛矿层之间的光学干涉效果，并且通过合理地调整其厚度，可以抑制特定波长的光反射，从而制造出具有各种颜色的 PSCs。这种多功能有机材料不仅可以调节 ST-PSCs 的光电性能，而且简化了器件的制备方法，降低了制造成本，是未来抗反射材料研究的一个重要方向。

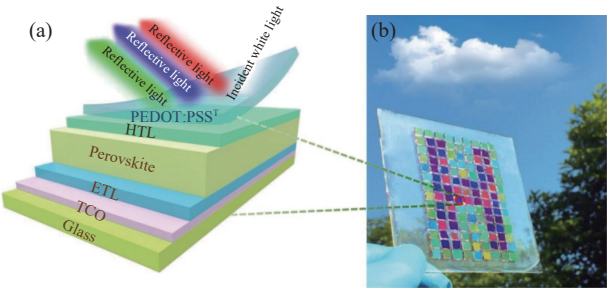


图9 (a) 以导电聚合物聚(3,4-乙基二噻吩):聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)作为顶部电极的电池的器件结构;(b) 由彩色钙钛矿太阳能电池组装的彩色原理图“H”的照片图像
每个像素基板的大小约为5 mm×5 mm (经许可转载)^[35]

Fig. 9 (a) Device architecture of the cells with conducting polymer poly(3,4-ethyldithiophene):poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) as the top electrode; (b) Photographic image of a colored schematic "H" assembled by colorful perovskite solar cells
Each pixel substrate is with the size of about 5 mm×5 mm
(Reproduced with permission)^[35]

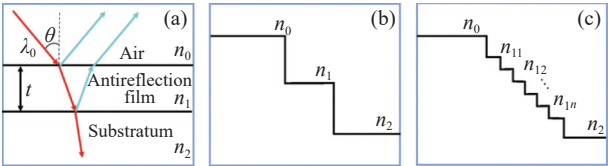
3.2 平面减反膜

在器件入射光一侧引入平面减反膜是一种较为简单的减反调控方法，通常人们使用带有电感耦合等离子体源 (ICP) 的直流脉冲溅射系统来制备高质量的平面减反膜。研究表明，对于波长为 λ_0 ，入射角为 θ 的单色光，当平面减反膜的折射率 n_1 满足式 (6) 所给出的关系时，入射光的反射率可以几乎降低到 0。

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$$
 (6)

其中： n_0 为空气折射率； n_2 为衬底折射率。3 个折射率的数值需满足 $n_0 < n_1 < n_2$ 的关系^[36]。图 10(a) 出了单层平面减反膜的光学传输模型，可以发现，单层平面减反膜的反射率与入射光的波长 λ_0 、入射角度 θ 和减反层的厚度 t 均有直接的关系，其中任何一个值发生偏离时薄膜的减反效果都将显著下降。

由于单层减反膜的窄带宽、入射角度窗口低等缺点，人们进一步提出了具有分级折射率的多层平面减反膜的设计思路。如图 10(b)、图 10(c) 所示，单层减反膜仅仅在空气和衬底之间制备一层减反膜，入射光依次通过折射率为 n_0 、 n_1 和 n_2 的介质，而在制备了多层减反膜之后，入射光需要经过折射率为 n_0 、 n_1 、 n_{11} 、 n_{12} 、...、 n_{1n} 、 n_2 的介质，这明显减小了相邻两层薄膜之间的折射率差。研究表明，多层减反膜可以在 450~750 nm 波段范围内将反射率降低到 1% 以下，Yu 等^[37] 以含有羧酸端基的可溶性聚酰亚胺 (6FDA-6FpDA-4ABA-



λ_0 —Wavelength of the incident light; θ —Incident angle; t —Thickness of the anti-reflection layer
图 10 (a) 单层平面减反膜的光学传输模型;(b) 折射率 n 变化示意图;
(c) 多层平面减反膜的折射率变化示意图

Fig. 10 (a) Optical transmission model of a single-layer planar anti-reflection coating; (b) Schematic diagram of refractive index n change; (c) Multilayer planar anti-reflection coating

COOH) 和丁醇钛为原料制备了高折射率的聚酰亚胺-二氧化钛 (6FDA-6FpDA-4ABA/TiO₂, PIT) 杂化光学薄膜，杂化薄膜中的二氧化钛含量在 0wt%~90wt% (PIT0-PIT90) 之间变化。研究表面，将所制备的聚酰亚胺/二氧化钛杂化薄膜进一步用于在玻璃和聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 衬底上，由 Silecs^R XC 530、PIT50 和 PIT90 组成 3 层减反膜在玻璃和 PMMA 基片上的平均反射率分别为 0.5% 和 0.8% (图 11)。显然，其具有杂有意的抗反射性，此外，它们在任何一种衬底上都具有优异的表面硬度和附着力特性。这些特性表明聚酰亚胺-无机杂化薄膜在先进光学器件减反膜领域具有潜在的应用前景。

3.3 微结构减反膜

通过微结构来降低反射率的灵感最初来源于飞蛾在夜间无障碍飞行的行为，人们发现飞蛾的眼睛是抛物面形状的周期性微结构，这种结构能够提供渐变的折射率，从而有效减少光的反射，提高夜视能力^[38]。图 12 给出了蛾眼减反膜结构图和折射率变化示意图。

值得注意的是，这种减反结构几乎同时克服了单层减反膜窄带宽、低入射角度窗口和多层减反膜严苛的键合能要求的缺点，其可定制的微观形貌和渐变的折射率提供了更大的入射角度窗口和更宽的波段范围，为进一步提高太阳电池的 PCE 提供了一种有效的光学管理办法^[39]。2019 年，Kim 等^[39] 采用聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 的软光刻方法，在 MAPbI_xBr_{3-x} 钙钛矿太阳能电池透明衬底上制备了具有不同大小蛾眼减反结构的 PDMS 薄膜 PDMS 减反射薄膜，从而将器件的短路电流密度 (J_{sc}) 从 23.83 mA/cm² 提高到 25.11 mA/cm²，PCE 从 19.66% 增加到 20.93%。显然微结构减反膜在未来是一项具有重大意义的光学减反调控措施。

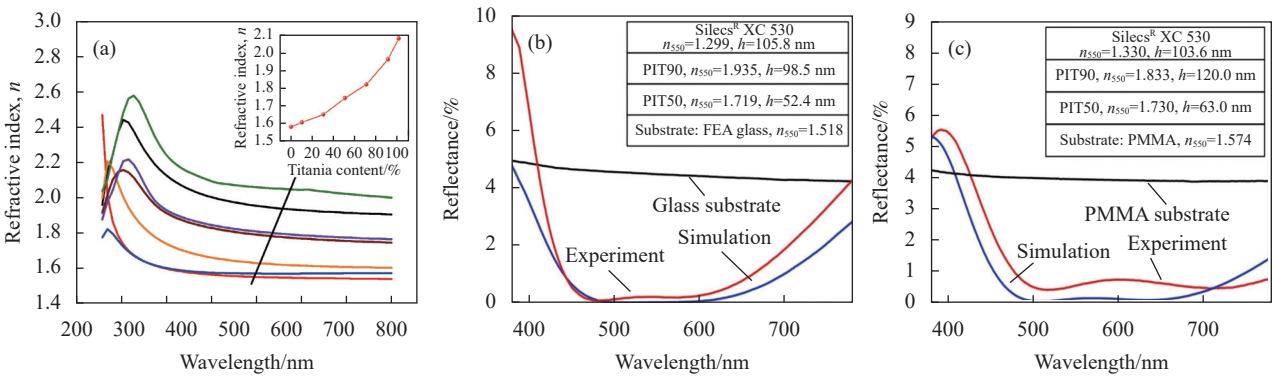


图 11 (a) PIT(0-100) 系列杂化薄膜的折射率和消光系数随波长的变化 (插图显示了折射率随二氧化钛含量的变化); 三层减反膜的反射率随波长的变化: 氟化物增强铝硅酸盐 (FEA) 玻璃 (b) 和聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 衬底 (c)。插图为三层增透膜的结构 (经许可转载)^[37]

Fig. 11 (a) Variation of the refractive index and extinction coefficient of the PIT(0-100) series hybrid films with wavelength (The inset figure shows the variation of refractive index with titania content); Variation on the reflectance of the three-layer coating with wavelength: Fluoride-enhanced aluminosilicate (FEA) glass (b) and polymethyl methacrylate (PMMA) substrate (c) (The inset figures are the structure of the three layer anti-reflective coatings) (Reproduced with permission)^[37]

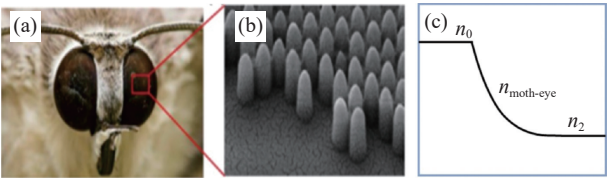


图 12 蛾眼减反膜结构: (a) 实物图; (b) 测试图; (c) 折射率变化图

Fig. 12 Motheye anti-reflective structure: (a) Physical diagram; (b) Test drawings; (c) Refractive index change diagram

4 透明度调控

与不透明光伏组件不同, 半透明电池所需的透过率取决于实际应用场景, 光伏窗所需的最低 AVT 为 20%~30%。提高透明度是目前半透明钙钛矿太阳能电池面临的主要挑战之一。因此, 优化 ST-PSCs 透明度的措施, 对获得优异的器件性能具有重要意义。

4.1 透明电极 (TE)

理想的 ST-PSCs 的电极应该具有高导电性、高透明度、较好的力学性能、稳定的化学性质。除此之外, 它还应该具有简单的制备工艺及较低的制造成本。目前常见的 TE 有超薄金属电极、透明导电氧化物、金属纳米线、透明导电聚合物、碳纳米管以及石墨烯透明电极等^[40]。本节以金属纳米线、透明导电氧化物为例, 就半透明钙钛矿太阳能电池中 TE 的应用情况做系统性的总结, 对比其光电性能及制备工艺的优缺点, 并展望了不同种类 TE 的改进方法。

4.1.1 透明导电氧化物

透明导电氧化物 (Transparent conductive oxide,

TCO) 一种是具有良好透光率的氧化物薄膜, 常通过掺杂来获得一定的导电性。常见的 TCO 包括铟掺杂的氧化锡 (ITO)、铝掺杂的氧化锌 (AZO)、铟锌氧化物 (IZO) 和氢掺杂氧化铟 (IO:H)^[41]。其主要特点是光透过率高 (AVT 为 85% 以上), 与其他类型透明电极相比它的电阻率较低, 空气稳定性好^[42], 有望取代传统的金属电极作为 ST-PSCs 的电极。

对 TCO 而言, 为了能够同时具有高导电性和高透过率, 就需要其具备较高的载流子迁移率。因此, 与传统的 ITO 薄膜相比, 在低温下具有更高迁移率的 IO:H 和 IZO 薄膜最近受到了更多关注^[43], 图 13(a) 为以 IO:H 为顶电极的 ST-PSCs 的截面扫描图。但是, 由于 TCO 的沉积过程多采用溅射的方式, 而直接在钙钛矿吸收层上溅射 TCO 将会对其造成损伤, 因此需要在钙钛矿吸收层和 TCO 电极之间引入合适的缓冲层。为了改进这一性能, 进一步提高半透明钙钛矿太阳能电池的整体性能, 研究人员采用两步面对靶溅射 (FTS) 在钙钛矿和电子传输层 (Electronic transmission layer, ETL) 的顶部上溅射锌掺杂的锡氧化物 (IZTO)^[44]。首先, IZTO 速度缓慢地在低直流电 (DC) 功率下溅射以形成薄 IZTO 保护层。然后在高 DC 功率下将 IZTO 快速溅射在缓冲层上以形成无晶界的顶部电极, 从而获得平坦且光滑的电极。以这种方式, 有效地抑制了由带电粒子轰击引起的钙钛矿薄膜损伤, 并且使 ST-PSCs 的 AVT 增加到 24.7%^[45]。

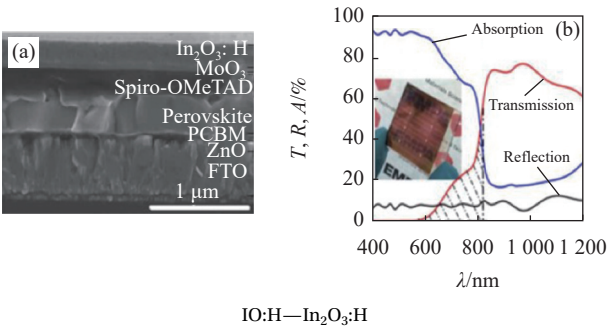


图 13 (a) 以 IO:H 为顶电极的半透明钙钛矿太阳能电池的截面扫描图像；(b) 该半透明钙钛矿太阳能电池的透过 (T)、吸收 (A) 及反射 (R) 光谱 (插图为器件的外观照片)(经许可转载)^[43]

Fig. 13 (a) Cross-sectional scan image of a translucent perovskite solar cell with IO:H as the top electrode; (b) The transmission (T), absorption (A) and reflection (R) spectra of the translucent perovskite solar cell (The external photos of the device are shown in the illustrations) (Reproduced with permission)^[43]

虽然基于金属氧化物材料制备 TCO 透明电极及其在 ST-PSCs 方面的应用已经取得了卓有成效的研究成果，但对于该类半透明电池的光学特性、稳定性、能级调控等方面的研究仍存在发展空间。这将是未来 ST-PSCs 的重要研究方向。

4.1.2 金属纳米线

银纳米线 (Silver nanowire, AgNWs) 具有高导电性、透明性 (片电阻低于 15 Ω/sq, 透光率达到 90%)、柔韧性和易加工性，是一种很有潜力的电极材料，图 14(a) 是以 AgNWs 为顶电极的 ST-PSCs 的结构示意图。Fang 等^[42] 采用快速径向电化学刻蚀方法精确切割长银纳米线，并通过设置合适的刻蚀条件来优化透射率和雾度。当柔性 AgNWs 层在 ST-PSCs 上作为顶部电极时，器件

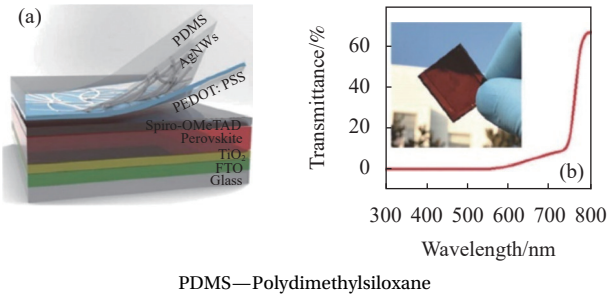


图 14 (a) 以银纳米线 (AgNWs) 为顶电极的半透明钙钛矿太阳能电池的结构示意图；(b) 该半透明钙钛矿太阳能电池的透过率光谱 (插图内为对应器件的外观照片)(经许可转载)^[42]

Fig. 14 (a) Schematic diagram of the structure of a translucent perovskite solar cell with silver nanowires (AgNWs) as the top electrode; (b) Transmittance spectrum of the translucent perovskite solar cell (The appearance photo of the corresponding device is shown in the inset) (Reproduced with permission)^[42]

将具备高透射率，使 PCE 提高至 16.03%。虽然 AgNWs 的光电性能优异，但仍存在粗糙度高、附着力差的缺点，这也是其主要改进方向。Xie 等^[46] 在 AgNWs 和 (6,6)-苯基-C61-丁酸甲酯 (PC61BM) 之间插入一层聚乙烯亚胺 (PEI)，减轻了 AgNWs 的电荷传输势垒，还抑制了它的化学腐蚀。PEI 层的添加大大增强了 ST-PSCs 的稳定性和光利用率 (LUE)。

除了 AgNWs, Au、Cu 和 Zn 的其他金属微纳米架构 (MMNAs) 也已被用作 ST-PSCs 的电极。目前，最先进的 MMNAs 电极的薄层电阻和透光率可与商业 ITO/FTO 电极相当甚至更好^[47]。因此，探索更先进的 MMNAs 作为透明电极以提高 ST-PSCs 的性能是非常重要的。

4.2 钙钛矿层调节

钙钛矿薄膜由于其高吸收系数 ($\approx 10^5 \text{ cm}^{-1}$)，在薄膜状态下，仍具有优异的光吸收能力。作为主要的光吸收层，钙钛矿层的厚度和成分是影响 ST-PSCs 的整体透明度的主要因素之一^[48]。通过调节钙钛矿层的厚度，或者钙钛矿的带隙等，可有效的调节器件 AVT。

4.2.1 厚度调节

在保证高 PCE 的前提下，通过调节钙钛矿膜的厚度，可以优化透过率和光吸收。减小钙钛矿厚度可以提高薄膜的 AVT。调节钙钛矿层厚度的常规方法是热蒸发或溶液处理技术^[49]。Roldan Carmona 等^[50] 通过调节共蒸发参数制备出具有不同钙钛矿厚度的 ST-PSCs，得出随着钙钛矿厚度的减小，AVT 会增大的结论。Della Gaspera 等^[51] 通过对不同的前驱体溶液浓度进行改变来尝试调整钙钛矿薄膜的厚度，且仍旧保持着薄膜的连续性，以期达到钙钛矿太阳能电池半透明化的目的。他们的工作让钙钛矿层膜厚在 54~289 nm 区间范围内改变，可见光透过率在 31%~7% 之间可调，相应的光电转换效率也实现了从 5.5% 至 13.6% 的变化。钙钛矿膜厚度为 105 nm 和 290 nm 的 ST-PSCs 的 AVT 分别为 19% 和 7%。如图 15(a) 所示^[41]。显然，具有较薄钙钛矿层的 ST-PSCs 会表现出较高的透光率。钙钛矿膜的厚度显著影响半透明钙钛矿太阳能电池的 AVT。但上述方法在膜厚的精准控制以及透光率的提升方面存在着一定的局限性。

值得注意的是随着钙钛矿层厚度减少，AVT 虽然呈现出显著的升高趋势，但是器件的性能却

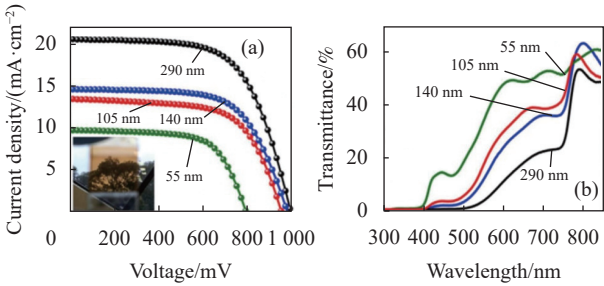


图 15 不同厚度钙钛矿薄膜对 PSCs 性能的影响: (a) 1 太阳光照下 PSCs 的 J - V 曲线; (b) 具有不同钙钛矿膜厚度的完整 PSCs 的透射光谱 (经许可转载)^[41]

Fig. 15 Characterization of PSCs with $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ films of different thicknesses: (a) J - V curves of PSCs under 1 sun illumination; (b) Transmittance spectra of complete PSCs with different $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ film thicknesses (Reproduced with permission)^[41]

呈现出明显的下降趋势的,这是由于随着薄膜厚度的降低,钙钛矿薄膜中可能会形成针孔等缺陷^[52],并降低膜的均匀覆盖性问题^[53]。这不可避免地降低薄膜的均匀性、稳定性和薄膜结晶质量,从而导致 PCE 损失^[54]。

综上所述,钙钛矿薄膜的厚度对其 AVT 与 PCE 有重要影响,需要在制备过程中进行精确控制,以获得具有优异性能的钙钛矿薄膜。

4.2.2 成分调节

钙钛矿材料的化学式通常表示为 ABX_3 ,一般为正八面体或立方体结构(图 16(a)),其中 A 一般为较大的阳离子(CH_3NH_3^+ 、 $\text{CH}(\text{NH}_2)_2^+$ 、 Cs^+)位于晶格的顶点, B 一般为较小的金属阳离子(Pb^{2+} 、 Sn^{2+})位于晶格的体心, X 一般为卤素阴离子(Cl^- 、 Br^- 、 I^-)位于晶格的面心。其中金属-卤素的键角和键长对带隙有着重要的影响,随着键长和键角的增加,带隙会随之降低^[2],从而调节器件 AVT。

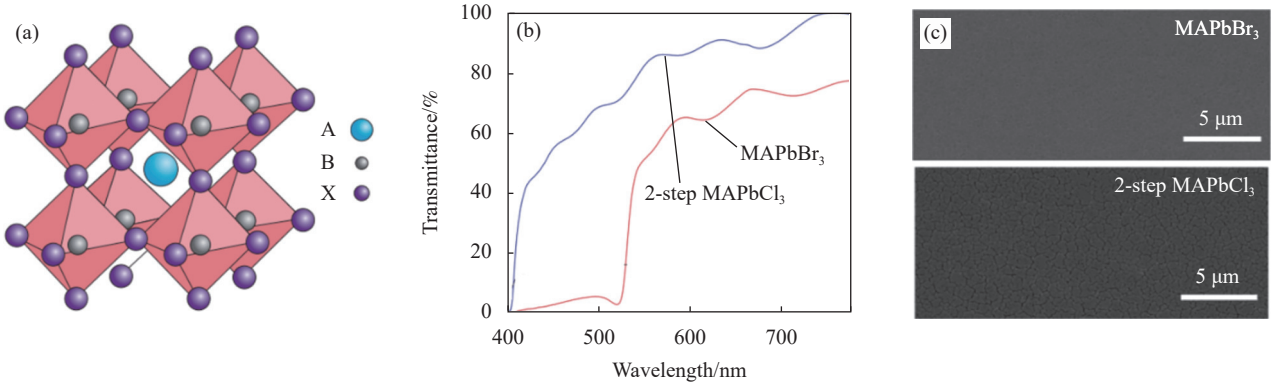


图 16 (a) 钙钛矿型晶体结构; MAPbCl_3 、 MAPbBr_3 薄膜的透射率光谱 (b) 和扫描电子显微镜图像 (c) (经许可转载)^[55-60]

Fig. 16 (a) Perovskite crystal structure; Transmittance spectra (b) and SEM images (c) of MAPbCl_3 and MAPbBr_3 film, respectively (Reproduced with permission)^[55-60]

成分调节是改变带隙的关键,一种既能提高 AVT 又能保持 PCE 的有效方法是钙钛矿层成分调节。

A 有机阳离子虽然没有直接对能带结构产生作用。但是它的大小却会引起晶格膨胀或收缩,从而影响金属离子与卤素离子的键长,进而导致带隙发生变化^[55]。例如:用 $\text{CH}(\text{NH}_2)_2^+$ 代替 CH_3NH_3^+ ,合成 $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbI}_3$ 。所合成的 $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbI}_3$ 带隙为 1.43 eV,并且能将吸收带边拓宽到 850 nm^[56]。对于 B 元素的调控可以影响键角的大小,从而对带隙产生影响。例如:用 Sn 替换 Pb,合成的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$,使吸收边蓝移,带隙增加^[57]。值得注意的是, X 元素的半径大小会直接影响着钙钛矿材料的晶格常数,原子半径增加,晶格常数也增加。这是因为较大的原子半径能够降低与铅元素之间的作用力,增加在长波区域对光的吸收。所以研究者可以通过调节 I-Cl 或 I-Br 的掺杂比例^[58]和 X 元素类别,对钙钛矿材料的 AVT 进行调控。

对于 ST-PSCs 来说,具有不同卤素元素的钙钛矿材料将有不同的带隙,分别允许阳光的不同能量光子通过,从而获得具有不同颜色和透明度的 ST-PSCs。Liu 等^[59]报道了一种阴离子交换技术,可以将低透明度 MAPbBr_3 转化为高透明度 MAPbCl_3 。如图 16(b) 所示,最短的透明截止波长从 525 nm (MAPbBr_3) 移动到 407 nm (MAPbCl_3),并且 AVT 随着卤化物交换时间从原始的 44% 增加到 76%。研究表明离子半径较小的 Cl^- 进入 MAPbBr_3 晶格中取代离子半径较大的 Br^- 。这会导致钙钛矿材料的晶格收缩和带隙增大,从而光吸收范围变窄,可见光透过率增加。同时,进一步精确控制卤化物的交换时间,也可以有效地调节

ST-PSCs 的透明度。

除了卤素元素可调带隙之外，添加剂也被认为是调节钙钛矿带隙从而提高 ST-PSCs 的透明度的另一种方式。例如，Ponchai 等^[60]将溴化甲醚 (FABr) 添加到钙钛矿中，FABr 具有合适的立方对称性和电子特性，具有更好的缺陷钝化性，对湿气和热均具有良好的电阻率，同时促进了 PCE 的改善。添加剂不仅可以调节钙钛矿材料的带隙和透射率，而且可以钝化缺陷，从而提高 LUE。

5 结论与展望

综上所述，本文围绕光物理特性系统总结了近年来半透明钙钛矿太阳能电池 (ST-PSCs) 在光子管理方面的研究进展。本文在简要概述了光子管理的理论基础后，系统地介绍了提升光通量和降低光损耗的关键措施。通过对这些措施的深入讨论，有望为进一步提升 ST-PSCs 的光利用率、实现商业化应用提供可行性参考。基于此，本论文提出以下几点展望 (图 17)：

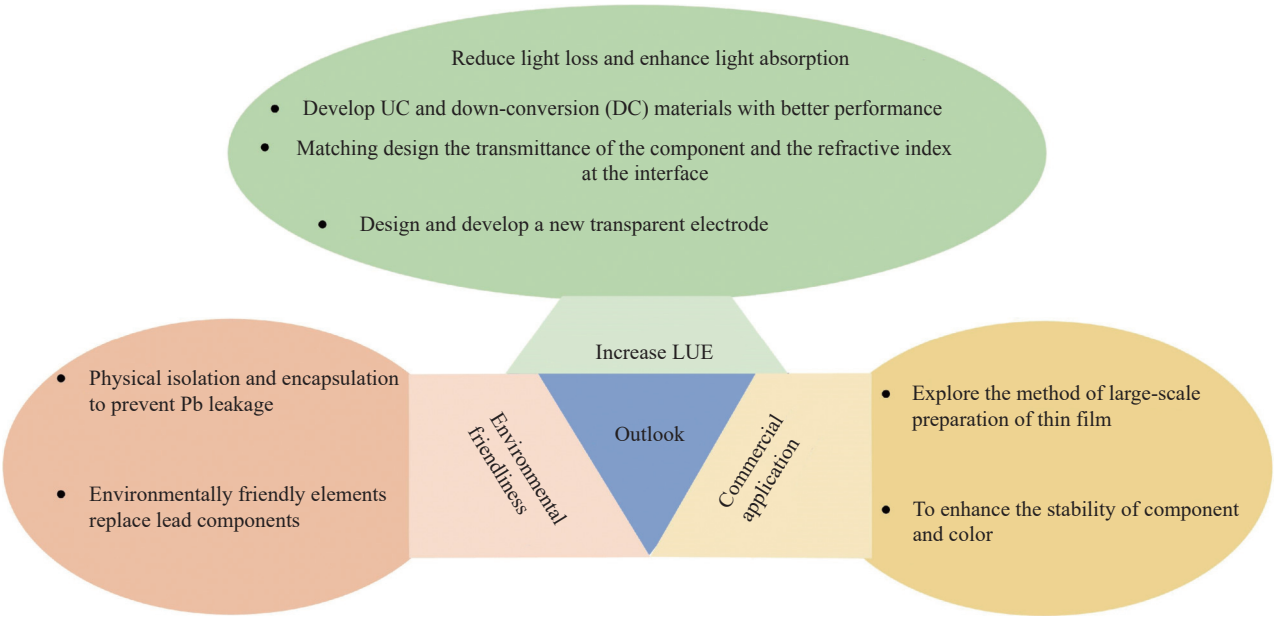


图 17 半透明钙钛矿太阳能电池提高光利用率 (LUE)、环境友好性和商业化应用的展望

Fig. 17 Improved light use efficiency (LUE), environmental friendliness, and prospects for commercial applications of translucent perovskite solar cells

继续寻找可以有效提高光电转换效率 (PCE) 和平均可见光透射率 (AVT) 的方法，进一步提高光利用率 (LUE)。需要更多的创新方法来减轻光损耗和增强光吸收，例如开发发射光谱与 ST-PSCs 的光响应良好匹配的上转换 (UC) 和下转换 (DC) 材料等。对每个组件 (衬底、光活性材料、界面层和电极) 的透射率和界面处的折射率需要匹配性设计，在实现最大化保证 PCE 的前提下进一步提高 AVT。另外，开发和设计具有高电导率、高透明性和良好环境稳定性的新型透明电极仍然是提高 ST-PSCs AVT 的关键性方案。

光伏器件的规模化和大面积制造技术的发展是商业化应用的关键一步。探索适合大面积制备的薄膜制备方法，使薄膜具有低方块电阻、高透明性和均匀的机械稳定性，对 ST-PSCs 得大规模

商业应用具有重要意义。

ST-PSCs 与传统半透明器件不同，其可以在保证出色的效率的同时具备透明度，并且呈现的颜色也是可调的，所以其在光伏建筑一体化 (BIPV)、串联器件、可穿戴电子等领域的有着广泛的应用前景，这也在稳定性和色彩美上对研究者们提出了更高要求。

当 ST-PSCs 遇到潮湿、阳光、高温和冰雹等外部环境时，钙钛矿层会发生降解，导致 Pb 泄漏。铅作为一种重金属，对环境和人体健康具有极大的潜在危害。应开发通过有机或无机材料的物理隔离和封装策略，有效地捕获或隔绝铅离子，防止铅的泄漏。可以用环境友好元素如 Sn、Ge、Bi 和其他金属元素部分或全部替代铅组分，减轻环境污染问题。

参考文献:

- [1] SNAITH H J. Perovskites: The emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells[J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2013, 4(21): 3623-3630.
- [2] GREEN M A, HO-BAILLIE A, SNAITH H J. The emergence of perovskite solar cells[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(7): 506-514.
- [3] STRANKS S D, SNAITH H J. Metal-halide perovskites for photovoltaic and light-emitting devices[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(5): 391-402.
- [4] ZHANG T Y, DAR M I, LI G, et al. Bication lead iodide 2D perovskite component to stabilize inorganic α -CsPbI₃ perovskite phase for high-efficiency solar cells[J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): e1700841.
- [5] LI G, ZHANG T Y, GUO N J, et al. Ion-exchange-induced 2D-3D conversion of HMA_{1-x}FA_xPbI₃Cl perovskite into a high-quality MA_{1-x}FA_xPbI₃ perovskite[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, 55(43): 13460-13464.
- [6] 周瑾璟, 钟敏. 铅卤钙钛矿太阳能电池界面工程的近期进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(5): 1937-1955.
ZHOU Jinjing, ZHONG Min. Recent progress of interface engineering for lead halide perovskite solar cells[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(5): 1937-1955(in Chinese).
- [7] YANG W S, NOH J H, JEON N J, et al. High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange[J]. *Science*, 2015, 348(6240): 1234-1237.
- [8] 安世崇, 黄茜, 陈沛润, 等. 半透明钙钛矿及叠层太阳能电池中的透明电极研究综述[J]. *材料导报*, 2020, 34(3): 75-85.
AN Shichong, HUANG Qian, CHEN Peirun, et al. Research progress of transparent electrodes in semi-transparent perovskite and tandem solar cells[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(3): 75-85(in Chinese).
- [9] KOJIMA A, TESHIMA K, SHIRAI Y, et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131(17): 6050-6051.
- [10] ZHU H W, TEALE S, LINTANGPRADIPTO M N, et al. Long-term operating stability in perovskite photovoltaics[J]. *Nature Reviews Materials*, 2023, 8(9): 569-586.
- [11] JACOBSSON T J, CORREA-BAEN J P, PAZOKI M, et al. Exploration of the compositional space for mixed lead halogen perovskites for high efficiency solar cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2016, 9(5): 1706-1724.
- [12] STRANKS S D, EPERON G E, GRANCINI G, et al. Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber[J]. *Science*, 2013, 342(6156): 341-344.
- [13] DE WOLF S, HOLOVSKY J, MOON S J, et al. Organometallic halide perovskites: Sharp optical absorption edge and its relation to photovoltaic performance[J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2014, 5(6): 1035-1039.
- [14] HAO F, STOUUMPOS C C, CAO D H, et al. Lead-free solid-state organic-inorganic halide perovskite solar cells[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(6): 489-494.
- [15] TONG Y, NAJAR A, WANG L, et al. Wide-bandgap organic-inorganic lead halide perovskite solar cells[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(14): 2105085.
- [16] HU Z H, WANG J, MA X L, et al. A critical review on semitransparent organic solar cells[J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105376.
- [17] XUE Q F, XIA R X, BRABEC C J, et al. Recent advances in semi-transparent polymer and perovskite solar cells for power generating window applications[J]. *Energy & Environmental Science*, 2018, 11(7): 1688-1709.
- [18] BALL J M, PETROZZA A. Defects in perovskite-halides and their effects in solar cells[J]. *Nature Energy*, 2016, 1: 16149.
- [19] JOHNSTON M B, HERZ L M. Hybrid perovskites for photovoltaics: Charge-carrier recombination, diffusion, and radiative efficiencies[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2016, 49(1): 146-154.
- [20] DERICIOGLU A F, KAGAWA Y. Effect of grain boundary microcracking on the light transmittance of sintered transparent MgAl₂O₄[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2003, 23(6): 951-959.
- [21] 张美荣, 祝曾伟, 郁骁琦, 等. 高效率双结钙钛矿叠层太阳能电池研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(2): 726-740.
ZHANG Meirong, ZHU Zengwei, YU Xiaoqi, et al. Research progress of high-efficiency double-junction perovskite tandem solar cells[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(2): 726-740(in Chinese).
- [22] CHEN Z, CHEN X, JIA Z Y, et al. Triplet exciton formation for non-radiative voltage loss in high-efficiency non-fullerene organic solar cells[J]. *Joule*, 2021, 5(7): 1832-1844.
- [23] RAI M, YUAN Z T, SADHU A, et al. Multimodal approach towards large area fully semitransparent perovskite solar module[J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(45): 2102276.
- [24] KIM K, NAM S K, CHO J, et al. Photon upconversion-assisted dual-band luminescence solar concentrators coupled with perovskite solar cells for highly efficient semitransparent photovoltaic systems[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(23): 12426-12431.
- [25] ATWATER H A, POLMAN A. Plasmonics for improved photovoltaic devices[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 205-213.

- [26] KONG L M, HONG S J. Analysis of multiple droop control strategies in DC microgrid[J]//2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Nanjing, China: APPEEC, 2020: 6.
- [27] RAHMAN M S, IBRAHIM M, MUNIRA S, et al. Plasmon enhanced semitransparent planar perovskite solar cells with copper nanocubes: FDTD study[C]//2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Macau, China: IEEE, 2019: 1570579884.
- [28] KIM G M, TATSUMA T. Semitransparent perovskite solar cells developed by considering human luminosity function[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 10699.
- [29] RAHMAN M S, IBRAHIM M. Position dependent impact of plasmonic nanocubes on the optical performance of perovskite solar cells: A simulation[C]//2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Macao, China: IEEE, 2019: 1570580748.
- [30] JIMENEZ-SOLANO A, CARRETERO-PALACIOS S, MIGUEZ H. Absorption enhancement in methylammonium lead iodide perovskite solar cells with embedded arrays of dielectric particles[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): A865-A878.
- [31] JUNG H, KIM G, JANG G S, et al. Transparent electrodes with enhanced infrared transmittance for semitransparent and four-terminal tandem perovskite solar cells[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(26): 30497-30503.
- [32] BUSH K A, PALMSTROM A F, YU Z J, et al. 23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability[J]. *Nature Energy*, 2017, 2: 17009.
- [33] GHARIBZADEH S, HOSSAIN I M, FASSL P, et al. 2D/3D heterostructure for semitransparent perovskite solar cells with engineered bandgap enables efficiencies exceeding 25% in four-terminal tandems with silicon and CIGS[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(19): 1909919.
- [34] SAHLI F, WERNER J, KAMINO B A, et al. Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency[J]. *Nature Materials*, 2018, 17(9): 820-826.
- [35] JIANG Y Y, LUO B W, JIANG F Y, et al. Efficient colorful perovskite solar cells using a top polymer electrode simultaneously as spectrally selective antireflection coating[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 7829-7835.
- [36] LEE H, PARK M, JEON M, et al. Multi-layer anti-reflection film based on SiO_x and NbO_x by DC pulse sputter system with inductively coupled plasma source[J]. *Crystals*, 2020, 10(6): 424.
- [37] YU Y Y, CHIEN W C, LIN J M, et al. High transparent polyimide/titania multi-layer anti-reflective hybrid films[J]. *Thin Solid Films*, 2011, 519(15): 4731-4736.
- [38] MODIGUNTA J K R, KIM J M, SONG H, et al. Fabrication of moth eye-like patterned polystyrene films and their functionalization with polyaniline via interfacial reaction[J]. *Polymer*, 2019, 179: 121636.
- [39] KIM M, JANG S, CHOI J, et al. Moth-eye structured polydimethylsiloxane films for high-efficiency perovskite solar cells[J]. *Nano-Micro Letters*, 2019, 11(1): 53.
- [40] LEE H, CHO S, NA S, et al. Thin metal top electrode and interface engineering for efficient and air-stable semitransparent perovskite solar cells[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 797: 65-73.
- [41] LEE K, GUO L J, PARK H J. Neutral- and multi-colored semitransparent perovskite solar cells[J]. *Molecules*, 2016, 21(4): 475.
- [42] FANG Y S, WU Z C, LI J, et al. High-performance hazy silver nanowire transparent electrodes through diameter tailoring for semitransparent photovoltaics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(9): 1705409.
- [43] FU F, FEURER T, JAGER T, et al. Low-temperature-processed efficient semi-transparent planar perovskite solar cells for bifacial and tandem applications[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8932.
- [44] LIM S, SEOK H, KWAK M, et al. Semi-transparent perovskite solar cells with bidirectional transparent electrodes[J]. *Nano Energy*, 2021, 82: 105703.
- [45] HEO J H, HAN H J, LEE M, et al. Stable semi-transparent $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ planar sandwich solar cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(10): 2922-2927.
- [46] XIE M, LU H, ZHANG L, et al. Fully solution-processed semi-transparent perovskite solar cells with ink-jet printed silver nanowires top electrode[J]. *Solar RRL*, 2018, 2(2): 1700184.
- [47] ZHANG Y, NG S, LU X, et al. Solution-processed transparent electrodes for emerging thin-film solar cells[J]. *Chemical Reviews*, 2020, 120(4): 2049-2122.
- [48] PARK N. Perovskite solar cells: An emerging photovoltaic technology[J]. *Materials Today*, 2015, 18(2): 65-72.
- [49] RAMIREZ Q C O, LEVCHUK I, BRONNBAUER C, et al. Pushing efficiency limits for semitransparent perovskite solar cells[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(47): 24071-24081.
- [50] ROLDAN-CARMONA C, MALINKIEWICZ O, BETANCUR R, et al. High efficiency single-junction semitransparent perovskite solar cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(9): 2968-2973.
- [51] DELLA GASPERA E, PENG Y, HOU Q, et al. Ultra-thin high efficiency semitransparent perovskite solar cells[J]. *Nano Energy*, 2015, 13: 249-257.
- [52] XIAO S, CHEN H, JIANG F, et al. Hierarchical dual-scaf-

- folds enhance charge separation and collection for high efficiency semitransparent perovskite solar cells[J]. [Advanced Materials Interfaces](#), 2016, 3(17): 1600484.
- [53] DOKKHAN C, MOKHTAR M Z, KE C, et al. Modulating crystallization in semitransparent perovskite films using submicrometer spongelike polymer colloid particles to improve solar cell performance[J]. [ACS Applied Energy Materials](#), 2019, 2(9): 6624-6633.
- [54] ONO L K, WANG S, KATO Y, et al. Fabrication of semitransparent perovskite films with centimeter-scale superior uniformity by the hybrid deposition method[J]. [Energy & Environmental Science](#), 2014, 7(12): 3989-3993.
- [55] KRISHNAMOORTHY T, DING H, YAN C, et al. Lead-free germanium iodide perovskite materials for photovoltaic applications[J]. [Journal of Materials Chemistry A](#), 2015, 3(47): 23829-23832.
- [56] PARK B, PHILIPPE B, ZHANG X, et al. Bismuth based hybrid perovskites $A_3Bi_2I_9$ (A: Methylammonium or cesium) for solar cell application[J]. [Advanced Materials](#), 2015, 27(43): 6806-6813.
- [57] HABISEEUTINGER S N, LEIJTENS T, EPERON G E, et al. Carbon nanotube/polymer composites as a highly stable hole collection layer in perovskite solar cells[J]. [Nano Letters](#), 2014, 14(10): 5561-5568.
- [58] JIANG C, YANG M, ZHOU Y, et al. Carrier separation and transport in perovskite solar cells studied by nanometre-scale profiling of electrical potential[J]. [Nature Communications](#), 2015, 6(1): 8397.
- [59] LIU Y, WANG J, WANG F, et al. Full-frame and high-contrast smart windows from halide-exchanged perovskites[J]. [Nature Communications](#), 2021, 12(1): 3360.
- [60] PONCHAI J, SRATHONGSIAN L, AMRATISHA K, et al. Modified colored semi-transparent perovskite solar cells with enhanced stability[J]. [Journal of Alloys and Compounds](#), 2021, 875: 159781.