



## 应用于光伏型智能窗的半透明钙钛矿太阳能电池:透明度与效率间的对立统一

姜欣, 陈琛, 于超, 姜文龙, 段羽

引用本文:

姜欣, 陈琛, 于超, 等. 应用于光伏型智能窗的半透明钙钛矿太阳能电池:透明度与效率间的对立统一[J]. *发光学报*, 2021, 42(2): 264–277.

JIANG Xin, CHEN Chen, YU Chao, et al. Semi-transparent Perovskite Solar Cells for Photovoltaic Smart Windows: Unity of Opposites between Transparency and Efficiency[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(2): 264–277.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200337>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 利用PNA添加剂来调控钙钛矿薄膜结晶和覆盖率实现高效太阳能电池

Tuning The Crystal-growth and Coverage of Perovskite Thin-films for Highly Efficient Solar Cells by Using Polyacrylonitrile Additive

发光学报. 2017, 38(7): 897–904 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173807.0897>

#### 利用PVP添加剂提高钙钛矿太阳能电池光伏性能

Enhancement of The Photovoltaic Performance of CH<sub>3</sub> NH<sub>3</sub> PbI<sub>3</sub> Perovskite Solar Cells by Using Polyvinylpyrrolidone Additive

发光学报. 2016, 37(1): 56–62 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163701.0056>

#### 利用吡啶添加剂提高钙钛矿太阳能电池的光伏性能

Improvement of The Performance of Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells by Using Pyridine as Additive

发光学报. 2017, 38(11): 1503–1509 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173811.1503>

#### 纳米ZnO墨水的溶剂及浓度优化及其在钙钛矿太阳能电池中的应用

Solvent and Concentration Optimization of Nano-ZnO Inks and Their Application in Perovskite Solar Cells

发光学报. 2016, 37(3): 265–273 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163703.0265>

#### 高效钙钛矿-有机本体异质结杂化串联太阳能电池

Efficient Perovskite-organic Bulk Heterojunction Hybrid Integrated Solar Cells

发光学报. 2015(9): 1047–1052 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153609.1047>

文章编号: 1000-7032(2021)02-0264-14

## 应用于光伏型智能窗的半透明钙钛矿太阳能电池： 透明度与效率间的对立统一

姜 欣<sup>1</sup>, 陈 琛<sup>2</sup>, 于 超<sup>2</sup>, 姜文龙<sup>1\*</sup>, 段 羽<sup>2\*</sup>

(1. 吉林师范大学信息技术学院 功能材料物理与化学教育部重点实验室, 吉林 长春 130103;

2. 吉林大学电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 新型杂化钙钛矿材料因其独特的光电特性可制备成半透明太阳能电池,应用于建筑物幕墙,实现对太阳能的收集。本文从光伏型智能窗的最新研究进展出发,归纳了钙钛矿太阳能电池应用到绿色建筑智能窗的主要方法和目前实现钙钛矿太阳能电池透明化的主要技术,并预测了其应用于智能窗的透明度和效率等问题。此外,采用随机抽样的方法进行用户调研,分析了光伏窗的成本与收益,对其商业应用前景进行了展望。

**关键词:** 钙钛矿; 智能窗; 半透明太阳能电池; 成本收益

中图分类号: TM914.4 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20200337

## Semi-transparent Perovskite Solar Cells for Photovoltaic Smart Windows: Unity of Opposites between Transparency and Efficiency

JIANG Xin<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>2</sup>, YU Chao<sup>2</sup>, JIANG Wen-long<sup>1\*</sup>, DUAN Yu<sup>2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Functional Materials Physics and Chemistry of Ministry of Education,  
College of Information & Technology, Jilin Normal University, Changchun 130103, China;

2. State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,  
Jilin University, Changchun 130012, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: jiang\_wl@163.com; duanyu@jlu.edu.cn

**Abstract:** Perovskite solar cells can be constructed as semi-transparent due to the materials' unique optical properties, which can be applied as the building integrated photovoltaic aiming to solar energy collection. Based on the latest research progress of photovoltaic smart window, this paper summarizes the main methods of perovskite solar cells applied to green building smart windows and the main technologies to realize the transparency of perovskite solar cells, and predicts the transparency and efficiency of the application of perovskite solar cells in smart windows. In addition, a random sampling method is used to conduct user surveys, analyzing the costs and benefits of photovoltaic windows, and prospecting for their commercial applications.

**Key words:** perovskite; smart windows; semi-transparent solar cells; cost-benefit

收稿日期: 2020-11-05; 修订日期: 2020-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(61974054,61675088); 吉林省国际科技合作项目(20190701023GH); 吉林省科技发展计划(20200401045GX)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61974054,61675088); International Science & Technology Cooperation Program of Jilin(20190701023GH); Project of Science and Technology Development Plan of Jilin Province(20200401045GX)

# 1 引言

据2020年2月国家统计局数据显示,我国城镇化率已超过60%,而这一数值还将持续增大<sup>[1]</sup>。城市人口数量的快速增加使得城市建筑密度骤增。而且随着人们生活水平的提高,对建筑舒适度的要求也日益增高,这势必导致建筑能耗的急剧增加。《2019中国建筑能耗研究报告》指出,2017年,我国建筑能耗(9.47亿吨标准煤)在全国能源消费总量中占比达21.10%,其中,公共建筑单位面积电耗的增长尤为明显,由2000年的26.42 kWh/m<sup>2</sup>增至2017年的62.74 kWh/m<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。浙江大学郑荣进等的研究表明,窗户作为建筑围护结构中对外开口的部位,经由其损失的照明、空调、采暖能耗超过建筑围护结构能源消费总量的50%<sup>[3]</sup>。因此,开发可以减少窗户能源耗散的智能窗(Smart windows)十分必要。

传统的智能窗通过对玻璃颜色的可控改变实

现对太阳光透射的调节,减少了热交换,从而实现节能减排的目的。常用的玻璃变色技术包括:电致变色<sup>[4-7]</sup>(图1(a)),气致变色<sup>[8-9]</sup>(图1(b)),热致变色<sup>[10-12]</sup>(图1(c)),光致变色<sup>[13-14]</sup>(图1(d))。目前,电致变色技术由于不依赖于开采难度较大的稀土元素,并且电致变色器件中的电解质可以基于生态友好的生物混合物<sup>[15-16]</sup>,最为广泛应用在智能窗领域。该技术最早由Lampert和Svensson于1984年提出<sup>[17-18]</sup>,然而,由于电致变色较为复杂的机理与材料制备工艺,在当时没有得到大规模推广<sup>[19]</sup>。

2008年,波音787飞机使用了电致变色的智能窗玻璃,有5档明暗度调节,如图2所示。

但是,传统的电致变色智能窗,通常需要额外的外部供电,并且对阻挡的太阳光没有储存,造成了一定的能源浪费。为进一步开发利用太阳能,新型智能窗——光伏型智能窗应运而生。其设计思想是把变色玻璃与太阳能电池结合在一起,真

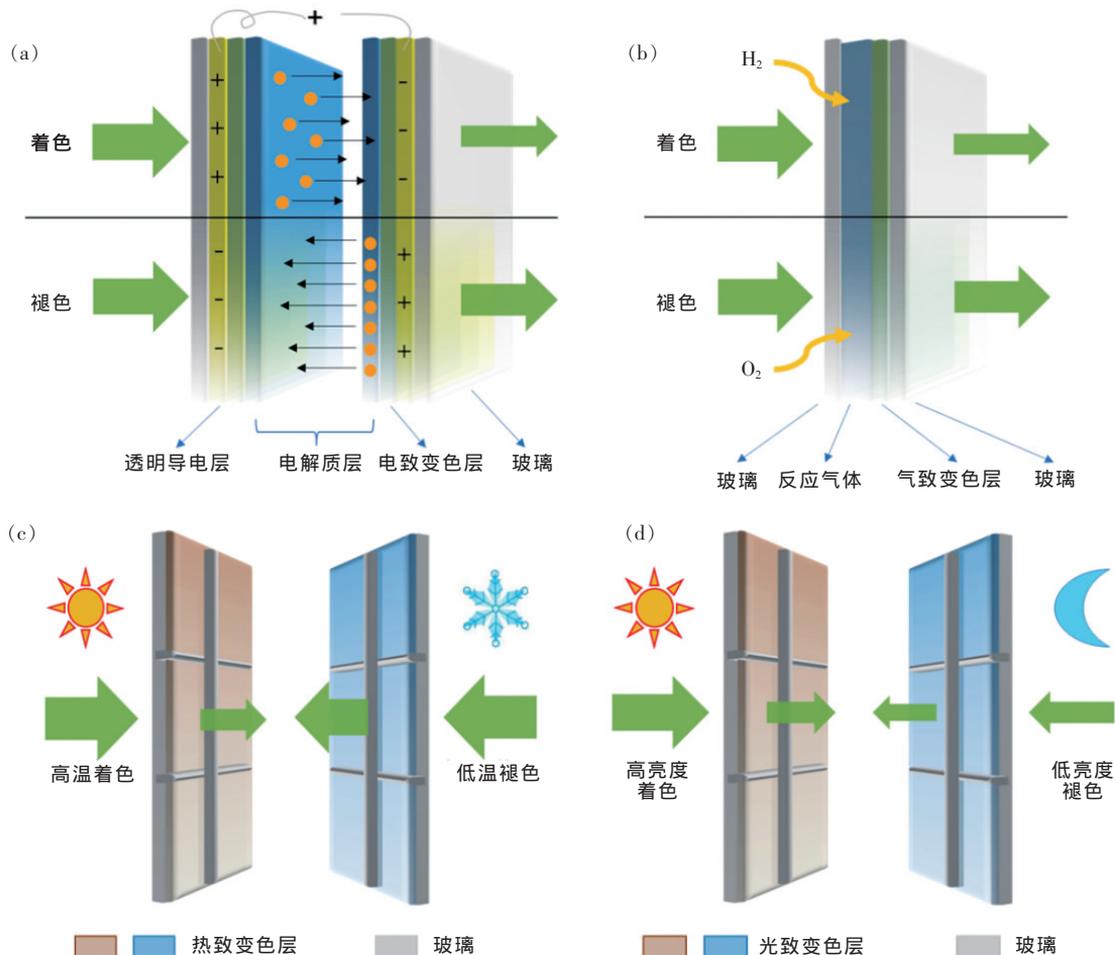


图1 电致变色(a)、气致变色(b)、热致变色(c)、光致变色(d)智能窗示意图。

Fig.1 Schematic diagram of electrochromic(a), gasochromic(b), thermochromic(c), and photochromic(d) smart windows.

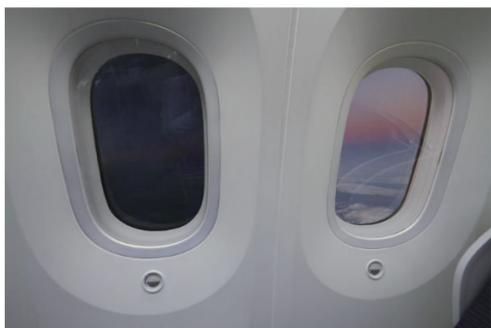
图 2 波音 787 飞机智能玻璃<sup>[20]</sup>Fig. 2 Boeing 787 smart glass<sup>[20]</sup>

表 1 不同光伏技术性能参数总结

Tab. 1 Summary of performance parameters of different photovoltaic technologies

光伏技术	PCE @ AVT/%	效率/%	制备成本	制备难度	材料广泛性	稳定性
晶体硅	-	26.7 ± 0.5 <sup>[22]</sup>	高	大	高	高
OPV	7.7 @ 37 AVT <sup>[23]</sup>	13.45 ± 0.2 <sup>[22]</sup>	低	小	高	低
DSSC	3.66 @ 60.3 500 ~ 600 nm <sup>[24]</sup>	11.9 ± 0.4 <sup>[22]</sup>	低	小	高	低
PSC	12.6 @ 21.5 AVT <sup>[25]</sup>	21.6 ± 0.6 <sup>[22]</sup>	低	小	高	低

有机太阳能电池由于加工工艺较为简单,且透明度可调节,材料价格比无机太阳能电池更低,可应用于新型光伏型智能窗。但是,其载流子迁移率较低,效率方面也差强人意,限制了其在工业上的发展<sup>[27]</sup>。

近年来,钙钛矿太阳能电池(Perovskite solar cells, PSCs)因其成本低廉、易大面积制备、加工工艺简单、色彩可调、并且能够实现对可见光透明等特点,引起了学界的广泛关注。使用钙钛矿制备的半透明光伏器件,具有易调节的功率转换效率(Power conversion efficiency, PCE)与可见光区平均透过率(Average visible transmittance, AVT),在光伏窗领域具有广阔的应用前景<sup>[28-33]</sup>。

综上所述,人口发展和全球能源危机等因素使新型光伏型智能窗的设计与研发日益迫切,然而在技术层面仍然有一些问题尚未解决。第一,太阳能电池的机理是将吸收的太阳能转化为电能,光伏窗的透明度与能源利用效率之间无法兼顾;第二,由于目前光伏窗的制备技术仍不完备,因此尚不能达成大规模批量生产;第三,光伏模块的成本较为高昂,不利于推广使用。针对上述问题,未来可使用喷墨打印、丝网印刷等技术制备光伏窗,也可调整器件结构,使用金属纳米线或石墨烯等新型透明电极提高器件透明度。本文就光伏

正做到在利用太阳能的基础上实现变色功能,同时免除外部供电,实现能源利用最大化。

2017年,商用太阳能电池出货量的市场占有率分别为单晶硅(49%)、多晶硅(46%)、碲化镉(CdTe)(3%)、铜钢镓硒(CIGS)(2%)等<sup>[21]</sup>。表1总结了使用不同光伏技术太阳能电池的主要性能参数。晶体硅是应用最为广泛的太阳能电池,然而,其本身是不透光的,且单晶硅的成本高昂,加工工艺也较为复杂;多晶硅虽然降低了成本,但牺牲了一定的转换效率,因此不适合应用到新型智能窗<sup>[26]</sup>。

型智能窗及半透明钙钛矿太阳能电池的发展现状做了详细总结,阐述了光伏窗的透明度与效率间的对立与统一,通过分析成本与收益展望了光伏窗的应用前景。

## 2 光伏型智能窗结构设计

目前,钙钛矿光伏型智能窗领域内比较常见的变色技术是电致变色和热致变色。电致变色器件的变色原理通常基于氧化还原反应,如图1(a)所示,在外加电场下,电致变色层中发生了离子的注入和抽出,使整个电致变色器件出现了着色和褪色的变化<sup>[4-7]</sup>。热致变色(图1(c))器件的主要工作原理是基于变色材料的相变,随着材料晶格的改变,材料对光的吸收、反射也发生了改变,导致整个器件的颜色变化<sup>[10-12]</sup>。

理想的光伏型智能窗需要快速可逆的颜色变换,变换过程中不需要外部供电,经过多次循环使用后效率降低不明显,并且能够储存智能窗收集到的电能,供给家庭用电所需。然而,由于材料和技术的限制,目前的光伏型智能窗仍不能同时实现以上功能。

图3(a)展示了浙江大学Xia等在2016年设计的基于钙钛矿的光伏型智能窗的结构,在智能窗内整合了钙钛矿电池和固态电致变色电池,具

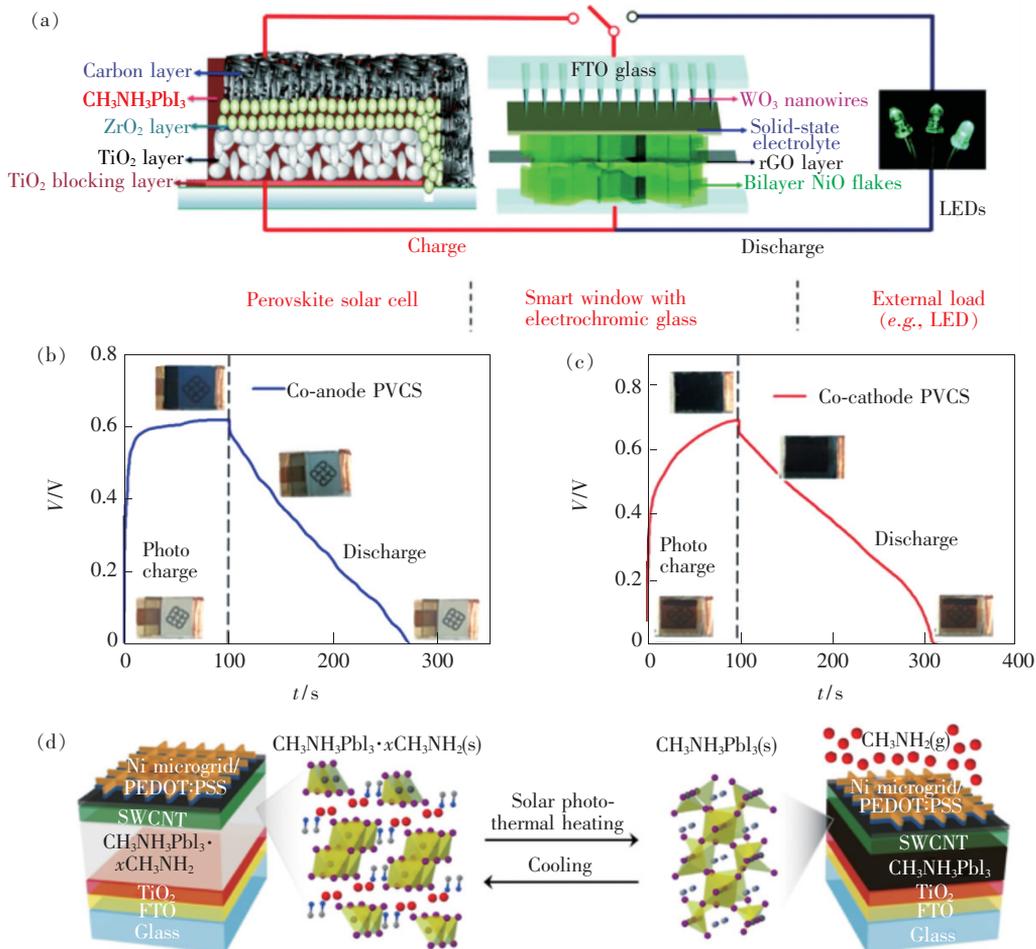


图 3 (a) 基于钙钛矿的光伏型智能窗结构<sup>[34]</sup>; (b) 共阳极 PVCS 的光充电过程和放电过程的电压-时间曲线<sup>[35]</sup>; (c) 共阴极 PVCS 的光充电过程和放电过程的电压-时间曲线<sup>[35]</sup>; (d) 基于钙钛矿的热致变色光伏型智能窗的器件结构与变色过程示意图<sup>[36]</sup>。

Fig. 3 (a) Photovoltaic smart window structure based on perovskite<sup>[34]</sup>. (b) Voltage-time curve of the photocharging and discharging process of co-anode PVCS<sup>[35]</sup>. (c) Voltage-time curve of the photocharging and discharging processes of co-cathode PVCS<sup>[35]</sup>. (d) Schematic of device structure and discoloration process of thermochromic photovoltaic smart window based on perovskite<sup>[36]</sup>.

有太阳能收集、电化学存储和再利用功能——钙钛矿太阳能电池收集到的电能存储在电致变色玻璃中,为外部设备(如 LED 灯)供电。伴随着固态电致变色电池能量的存储与释放,智能窗实现了高度可逆的蓝色态和透明态间的转换,并且在红外区域的光学调节能力尤为突出——2 000 nm 处的透过率从蓝色态的 69% 降到了透明态的 7%<sup>[34]</sup>。这项工作解决了光伏窗太阳能的存储问题,然而,由于制备的钙钛矿电池不是透明的,没有集成到可变色的大面积窗玻璃中,太阳能利用率较低。

同年,中国香港理工大学 Chai 等设计了一种新型光伏电致变色超级电容器 (Photovoltaichromic

supercapacitors, 简称 PVCSs), 解决了上文所述智能窗太阳能利用率较低的问题。该器件集成了钙钛矿太阳能电池与电致变色超级电容器,实现了太阳能的收集与存储。在共阳极与共阴极结构 PVCSs 中,光伏组件的 PCE 分别为 8.25% 与 11.89%, 如图 3 (b) 和 3 (c) 所示,其在储能的同时,电致变色电容器的颜色由半透明变为深蓝色(共阳极(共阴极)结构 PVCSs 变色层在可见光区的平均透过率 (AVT) 由 85% (76.2%) 降至 35.1% (23.0%)), 阻挡了大部分光照,电容器自动停止充电,防止了 PSCs 长时间曝光,延长了其寿命<sup>[35]</sup>。

由于钙钛矿光伏窗颜色变换的速度普遍较为

缓慢,2017年,针对该问题,美国国家可再生能源实验室 Wheeler 等设计了基于钙钛矿的热致变色光伏型智能窗。器件结构及变色原理如图 3(d) 所示。器件经过太阳光辐射加热,分解出  $\text{CH}_3\text{NH}_2$ , 可见光透射率从 68% 逐渐下降到低于 3%, 颜色变为深红, PCE 达到了 11.3%, 冷却后重新形成  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3 \cdot x\text{CH}_3\text{NH}_2$ , 恢复至透明状态。该器件可在 3 min 内实现颜色变换。然而,器件的稳定性较差,经过 20 次循环,最大电流从 1 mA 降至 0.18 mA<sup>[36]</sup>。

随后,在 2018 年,美国加州大学伯克利分校 Yang 等设计了结构为  $\text{Glass}/\text{FTO}/\text{NiO}_x/\text{CsPbI}_{3-x}\text{Br}_x/\text{ZnO}/\text{Al-doped ZnO}/\text{ITO}$  的基于钙钛矿的热致变色光伏型智能窗,引起了学术界的广泛关注。研究表明,当吸光层为  $\text{CsPbIBr}_2$  时,器件可在低温相的可见光透过率 81.7% 和高温相的可见光透过率 35.4% 间相互转换,相应的 PCE 为 0.15% 和 4.69%。该结构显著提升了器件的循环稳定性,在经过 40 次循环测试后,峰值 PCE 仍保持在 85% 以上<sup>[37]</sup>。遗憾的是,该器件的相变温度高达 105 °C,不能直接应用到实际的光伏型智能窗中。

为了解决光伏窗颜色变换温度过高的问题,2019 年,江汉大学 Liu 等设计了双层钙钛矿光伏型智能窗,内层为液晶/聚合物复合材料(LCPC)层,以控制智能窗的透明度,外层为半透明的钙钛矿太阳能电池,提供电能。在高温状态(37.8 ~ 67 °C)下,智能窗由半透明转为不透明的红橙色,再经过电场,可以实现不透明到半透明的转换,即在高温情况下光伏窗也可以是半透明的。平均 PCE 在低温半透明状态、高温半透明状态和高温不透明状态下分别为 16.66% ± 1.0%、16.60% ± 0.9%、17.84% ± 0.9%<sup>[38]</sup>。这项工作为钙钛矿光伏窗的实际应用奠定了基础,其优秀的 PCE 性能、良好的循环稳定性、贴合实际的颜色转换温度,为接下来的研究指引了方向。

综上,制备钙钛矿光伏型智能窗的技术手段主要有两种:第一种将光伏窗中变色模块和光伏模块分开制备,再通过结构设计组合到一起以实现光伏窗的功能。这种方法可以很方便地调节窗户的透明度,然而多数使用的是只有单一色态的钙钛矿太阳能电池,在透明度与效率间无法兼顾。另一种是直接制备热致变色的钙钛矿光伏窗,通

过温度调节器件的透明度,在深色态器件会获得较高的 PCE,但器件的色态转换较为困难,温度控制仍是后续研究的重点。尽管目前基于钙钛矿的光伏型智能窗已经实现了光电转换效率的飞跃,颜色调节、能量存储等功能也日趋完善,但是想要真正实现商用,钙钛矿太阳能电池的稳定性以及铅的毒性等问题都亟需解决。

### 3 半透明钙钛矿太阳能电池的发展现状

钙钛矿材料因其独特的光电特性,所制备的钙钛矿太阳能电池已经可以实现超过 25% 的光电转换效率<sup>[39-40]</sup>,可与目前大规模应用的硅电池相媲美。通过调节钙钛矿的带隙,或者改变钙钛矿在电池中的布局结构(比如减少钙钛矿层的厚度、降低其表面覆盖率),可以实现器件的半透明化<sup>[41]</sup>,为制造钙钛矿光伏型智能窗提供了可能。

对于智能窗应用,半透明钙钛矿太阳能电池需要具有以下特性:较高的可见光区平均透过率(Average visible transmittance, AVT)、较大的颜色对比度及较好的显色指数(Color rendering index, CRI)。

#### 3.1 超薄钙钛矿层

通过减薄钙钛矿层的厚度,可以增加半透明太阳能电池的透射率。2015 年,澳大利亚莫纳什大学 Cheng 等使用约 50 nm 厚的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  层以及电介质-金属-电介质(DMD)( $\text{MoO}_3$ -Au- $\text{MoO}_3$ )透明电极,制备的半透明钙钛矿太阳能电池实现了 31% 的 AVT 与 5.3% 的 PCE。如果增加  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  层的厚度(约 290 nm),相应的 PCE 也会增加(13.6%),但 AVT 降至 7%<sup>[42]</sup>。2016 年,中国香港科技大学 Yang 等基于约 100 nm 厚的超薄钙钛矿层,使用 PEDOT:PSS 作为背电极,制备了双支架(准介孔  $\text{TiO}_2$  作无机支架,苯基-C61-丁酸异甲酯(PCBM)网作有机支架)半透明钙钛矿太阳能电池。这种特殊的双支架结构改善了电荷收集效率,最后得到了 8.21% 的 PCE 和 23% 的 AVT<sup>[43]</sup>。2019 年,澳大利亚新南威尔士大学 Upama 等在低温环境下,用溶液处理的方式制备了具有 n-i-p 结构的半透明钙钛矿太阳能电池,所使用的  $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$  背电极厚度仅为 51 nm。通过改变钙钛矿层的厚度,实现对器件透明度的调节,当  $\text{MAPbI}_3$  厚度为 40 nm 时,可以实现

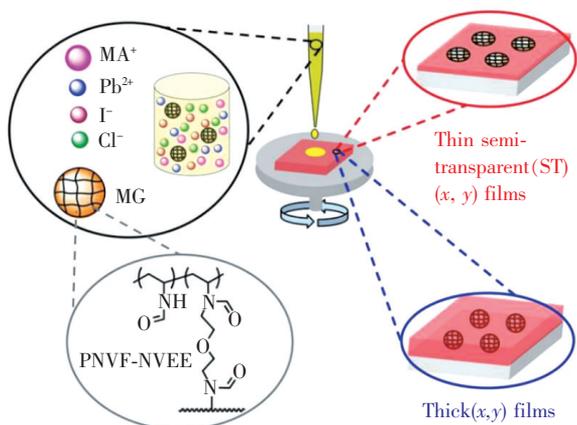


图4 使用微凝胶辅助制备半透明钙钛矿薄膜过程示意图<sup>[45]</sup>

Fig.4 Schematic of semi-transparent perovskite film preparation assisted by microgels<sup>[45]</sup>

AVT 最大值 20.5% ,此时 PCE 约为 3.5%<sup>[44]</sup>。

虽然减小钙钛矿层厚度的方法可以增加太阳能电池的透明度,但它却牺牲了器件的 PCE 和稳定性。2019 年,英国曼彻斯特大学 Saunders 等针对钙钛矿薄膜的均匀性覆盖问题,如图 4 所示,在制备  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ( $\text{MAPbI}_3$ ) 的钙钛矿薄膜的过程中使用亚微米级的可膨胀聚合物胶体颗粒做添加剂,10 nm 的半透明薄膜下 AVT 达到了 46.8% ,PCE 也达到了 7.69% ,展现了其应用于半透明光伏型智能窗的巨大潜力<sup>[45]</sup>。

### 3.2 降低活性层表面覆盖率

由于钙钛矿本身呈现黄棕色或者红棕色,由超薄钙钛矿层制备的钙钛矿太阳能电池也避免不了颜色偏棕,限制了其在光伏型智能窗上的应用。另一种比较常见的实现钙钛矿太阳能电池半透明化的方法是降低活性层的覆盖率,可以实现中性色的半透明钙钛矿太阳能电池。

2014 年,英国牛津大学 Snaith 等通过去湿来控制钙钛矿薄膜的形态,形成钙钛矿“岛”状结构,所制备的半透明太阳能电池结构如图 5(a) 所示,在 7%~30% 的 AVT 下,PCE 约为 8%~3.5%。图 5(b) 展示了制备在玻璃上的钙钛矿薄膜,表现出了优秀的中性色。将 D102 染料溶解于 Spiro-OMeTAD 中,器件呈现出了漂亮的“玫瑰色”,如图 5(c) 所示<sup>[29]</sup>。这项工作体现了良好的颜色性能,为之后的研究提供了很好的思路。

2016 年,韩国庆熙大学 Im 等采用岛状结构的  $\text{MAPbI}_3$  制备中性色的半透明钙钛矿太阳能电

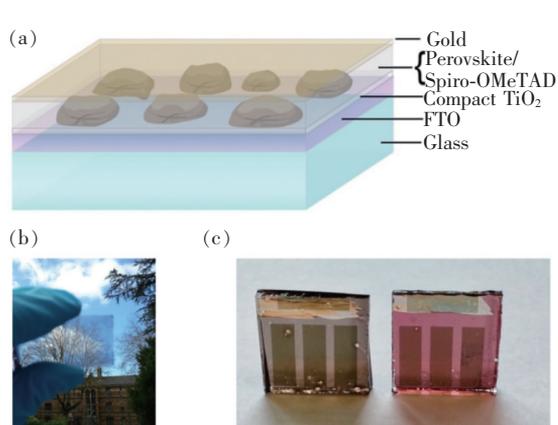


图5 (a) 钙钛矿太阳能电池结构图<sup>[29]</sup>; (b) 半透明钙钛矿薄膜照片<sup>[29]</sup>; (c) 添加 D102 染料(右)与没添加(左)的器件对照图<sup>[29]</sup>。

Fig.5 (a) Structure diagram of perovskite solar cell<sup>[29]</sup>. (b) Photograph of semi-transparent perovskite film<sup>[29]</sup>. (c) A comparison of devices with (right) and without (left) D102 dyes<sup>[29]</sup>.

池。为了解决电子传输层  $\text{TiO}_2$  和空穴传输层 PTAA 因直接接触引起的载流子复合问题,引入聚苯乙烯(PS)作钝化层。器件反向扫描 PCE 为 10.6% ,AVT 为 20.9% ,同时也表现出了优秀的稳定性,30 d 效率仅下降 5%<sup>[46]</sup>。

2018 年,韩国全北国立大学 Hahn 等在大气环境下用溶液法制备了岛状结构 ( $\text{MAPbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ -NiO 纳米颗粒) 的半透明钙钛矿太阳能电池,并使用  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiO}$  界面工程来降低界面复合,器件在 AVT 为 27% 的情况下,PCE 可达到 10%。同时,器件展现出优异的稳定性,在 25~30 °C 和 45%~50% 湿度的大气环境下存放 270 d 后,未经封装的器件仍能保持在初始 PCE 的 93%<sup>[47]</sup>。这项工作不仅制备条件较为宽松,器件的稳定性也十分优秀,具有广阔的应用前景。

除了构建钙钛矿“岛”来实现活性层覆盖率的降低,还可以通过改变钙钛矿微观结构的方式。2015 年,英国牛津大学 Snaith 等以 PS 为模板制备了  $\text{SiO}_2$  蜂窝薄膜,钙钛矿随后渗透其中,形成了具有特殊图案的钙钛矿薄膜,制备的器件具有较高的 AVT (37% ),同时 PCE 也高达 9.5%。相比他们之前以去湿技术制备的基于岛状钙钛矿的半透明太阳能电池,器件的 PCE 和 AVT 都有了明显的提升,这是由于该结构提升了开路电压  $V_{oc}$  与填充因子 FF。 $\text{SiO}_2$  蜂窝薄膜另一个显著的优点在于分离了电子传输层

和空穴传输层,避免了分流电阻的产生<sup>[48]</sup>。

2016年,韩国延世大学 Moon 等使用阳极氧化铝(AAO)作为支架,将钙钛矿通过旋涂渗入其中,形成纳米柱状结构,抑制了离子迁移,从而使器件的稳定性有所增强。使用 AAO 模板可以很方便地控制钙钛矿的高度与体积,改变器件的透过率。经过优化的器件在 PCE 为 9.6% 时,AVT 为 33.4%;PCE 为 7.5% 时,AVT 达到 41.7%<sup>[49]</sup>。最近,Moon 等基于之前的工作,制备了 40.8 cm<sup>2</sup> 半透明钙钛矿太阳能组件,器件结构如图 6(a)所示,其包含 9 个子电池,PCE 和 AVT 分别为 9.04% 和 30.2%<sup>[30]</sup>。这项工作表明钙钛矿材料在制备

大面积半透明太阳能电池这方面可以有十分优秀的表现,是光伏型智能窗的最佳候选材料之一。

2018年,新加坡南洋理工大学 Wong 等设计了一种制备钙钛矿网格的 1.5 步沉积法,如图 6(b)所示。他们先是沉积具有网格结构的钙钛矿,随后将其浸入到碘化甲脒(FAI)与异丙醇(IPA)的热溶液中,该方法使网格孔隙填充得更好,同时也提高了晶体的质量,提升了稳定性。器件在 28% 的 AVT 下 PCE 也可以达到 10%,表现出了较为优秀的光电性能<sup>[50]</sup>。由于采用了丝网印刷技术,可以预期其在制备大面积钙钛矿太阳能电池方面广阔的应用前景。

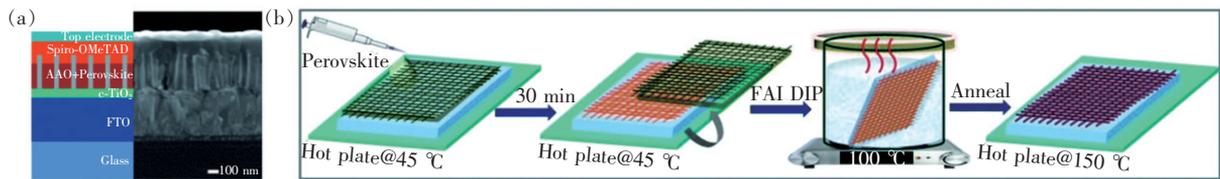


图 6 (a)使用 AAO 支架的钙钛矿太阳能电池结构示意图与横截面形貌图<sup>[30]</sup>; (b)制备钙钛矿网格的 1.5 步沉积法<sup>[50]</sup>。  
Fig. 6 (a)Schematic and cross section morphology of perovskite solar cell using AAO scaffold<sup>[30]</sup>. (b)Preparation of perovskite grid by 1.5 step deposition<sup>[50]</sup>.

除了上述制备半透明钙钛矿太阳能电池的方法,还有一些其他技术值得关注,比如无铅的半透明器件。2020年,北京大学 Xiao 等使用无铅卤化物双钙钛矿制备了半透明太阳能电池,器件结构为 ITO/SnO<sub>2</sub>/Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub>/Spiro-OMeTAD/MoO<sub>3</sub>/ITO, 尽管 PCE 稍低(1.56%),但 AVT 高达 72.6%, Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> 薄膜可吸收约 90% 的紫外光,器件表现出了优秀的紫外防护性能。在实际应用中,可以结合红外防护器件,保留可见光区的光透射,同

时降低由红外光引起的温度升高以及紫外光对人体造成的伤害<sup>[51]</sup>。

表 2 总结了制备半透明钙钛矿太阳能电池的技术方法及其性能。虽然目前半透明钙钛矿太阳能电池在智能窗应用领域中的器件效率与可见光区平均透过率已有了较大进展,然而,其在大面积半透明器件上的应用报道较少,距离实际应用仍有明显差距。因此,制备大面积光伏器件仍是以后研究的重点。

表 2 半透明钙钛矿太阳能电池的技术方法与性能总结

Tab. 2 Summary of technical methods and performance for semi-transparent perovskite solar cells

半透明器件实现方式	器件结构	PCE/%	AVT/%	参考文献
超薄钙钛矿层	FTO/TiO <sub>2</sub> /CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> /Spiro-OMeTAD/MoO <sub>3</sub> /Au/MoO <sub>3</sub>	5.3	31	[42]
	FTO/Dual scaffold/Perovskite/Spiro-OMeTAD/PEDOT: PSS	8.21	23	[43]
	ITO/PC <sub>71</sub> BM/MAPbI <sub>3</sub> /Spiro-OMeTAD/MoO <sub>3</sub> /Ag/MoO <sub>3</sub>	3.4~9.23	14.1~20.5	[44]
岛状结构钙钛矿	FTO/TiO <sub>2</sub> /Perovskite/Spiro-OMeTAD/Au	3.5~8	7~30	[29]
	FTO/TiO <sub>2</sub> /PS/MAPbI <sub>3</sub> /PTAA/PEDOT: PSS/ITO	10.6	20.9	[46]
	FTO/c-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /NiO/MAPbI <sub>3-x</sub> Cl <sub>x</sub> -NiO/Spiro-OMeTAD/Au	10.06	27	[47]
	FTO/c-TiO <sub>2</sub> /Perovskite/PTAA/Au	15.46	35.2	[52]
蜂窝结构钙钛矿	FTO/TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> -MAPbI <sub>3-x</sub> Cl <sub>x</sub> /Spiro-OMeTAD/Ag	9.5	37	[48]

表 2(续)

半透明器件实现方式	器件结构	PCE/%	AVT/%	参考文献
纳米柱状结构钙钛矿	FTO/c-TiO <sub>2</sub> /AAO + MAPbI <sub>3-x</sub> Cl <sub>x</sub> /Spiro-OMeTAD/MoO <sub>x</sub> /ITO	9.6/7.5	33.4/41.7	[49]
	FTO/c-TiO <sub>2</sub> /AAO + MAPbI <sub>3-x</sub> Cl <sub>x</sub> /Spiro-OMeTAD/MoO <sub>x</sub> /ITO	9.04	30.2	[30]
网格结构钙钛矿	FTO/c-TiO <sub>2</sub> /m-TiO <sub>2</sub> /Perovskite/Spiro-OMeTAD/Au	10.03	28	[50]
PCBM 辅助钙钛矿生长	ITO/PEDOT: PSS/Perovskite/PCBM/Au	9.1	18	[53]

## 4 光伏型智能窗的透明度与效率间的对立统一关系

光是我们工作和生活中必不可少的因素,光的直接照射可以给我们带来光明,光的反射可以让我们看清物体。意大利那不勒斯费德里克二世大学 Bellia 等的研究表明,不适当或者不充分的光照会对人的生活节律造成影响<sup>[54]</sup>。出于对健康、实用和美观等方面的需求,光伏型智能窗需要具有较高的透明度,AVT 至少要达到 25%。然而,更高的 AVT 通常意味着较薄的钙钛矿层,直接影响智能窗的光电转换效率。

2017 年,日本东京大学 Tatsuma 等在制备半透明钙钛矿太阳能电池时考虑到了人眼对不同波长的光所感受到的明暗程度不同。在光线充足的条件下,人眼对 550 nm 的绿色光最敏感,视见函数曲线如图 7 所示。制备的器件主要在深红和深蓝等人眼不太敏感的光区收集光子,因此可以提供视觉上较为透明的器件<sup>[55]</sup>。

一般来说,半透明钙钛矿太阳能电池的颜色主要取决于钙钛矿中 X 点位的元素种类和器件

的吸收光谱。表 3 总结了目前一些典型的半透明钙钛矿光伏型智能窗活性层使用的材料及相应的深色、浅色态的 PCE 与 AVT,并估算了其在可见光区内的透射光谱。由于太阳能电池的固有属性,活性层对光子的吸收越多,可转化的能量越多,PCE 随之升高,而 AVT 随之下落。因此,需要在 PCE 和 AVT 中寻找一个平衡。一个办法是让太阳能电池主要吸收非可见光,保留可见光区较高的透过率,这可能设计一些特殊的功能材料配合新颖的器件结构来实现。

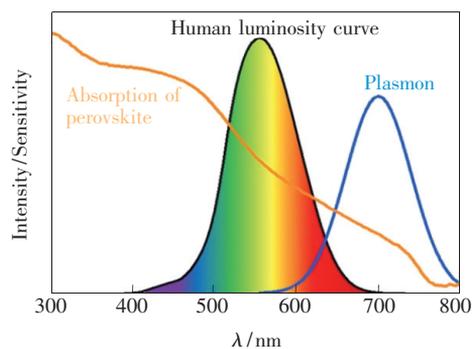
图 7 视见函数曲线<sup>[55]</sup>Fig. 7 Human luminosity curve<sup>[55]</sup>

表 3 半透明钙钛矿光伏型智能窗参数总结

Tab. 3 Summary of parameters of semi-transparent perovskite photovoltaic smart windows

活性层	深色态	深色态	深色态	透明态	透明态	透明态	参考 文献
	PCE/%	AVT/%	可见光区 透射光谱/nm	PCE/%	AVT/%	可见光区 透射光谱/nm	
CsPbIBr <sub>2</sub>	4.69	35.4	580 ~ 800	0.15	81.7	430 ~ 800	[37]
MAPbI <sub>3-x</sub> Cl <sub>x</sub>	2.26/3.73	35.1/23.0	-	5.78/7.98	85/76.2	600 ~ 800	[35]
MAPbI <sub>3</sub>	11.3	3	750 ~ 800	-	68	430 ~ 800	[36]
MAPbI <sub>3-x</sub> Br <sub>x</sub>	-	34.3	650 ~ 800	-	85	400 ~ 800	[10]
(FAPbI <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> (MAPbBr <sub>3</sub> ) <sub>1-x</sub>	18.02	-	无	16.70	-	-	[38]
MAPbI <sub>3</sub>	-	8.4	450 ~ 600	3.7	26	450 ~ 700	[56]

## 5 光伏型智能窗发展前景

### 5.1 光伏型智能窗用户调研

为了考察用户对光伏窗的接受程度,我们对

吉林省长春市的居民进行了问卷调研,共发放 220 份调查问卷,收到 194 份回执,回收率为 88.18%。调查结果如图 8 所示,约有 71% 的居民对光伏型智能窗的使用寿命期望年限在 15 ~ 25 年之间,约

86%的居民希望将成本控制在每平方米2 000元以内,约48%居民希望能在10~15年内回本(即通过光伏发电的方式,收益能够抵消前期的资金投入与每年的维护费用)。

## 5.2 光伏型智能窗成本分析

我国户用分布式光伏安装主要有三种运营模式:全部自用,全部上网,自发自用、余电上网<sup>[57]</sup>。其中,大多数家庭选择“自发自用、余电上网”<sup>[58]</sup>。

本文从“自发自用、余电上网”的角度进行成本核算,具有较为广泛的意义。

投资方面,主要考虑光伏模块成本 $C_{pvm}$ 、逆变器成本 $C_{inv}$ 、线缆和支架等成本 $C_{oth}$ 以及每年的维护成本 $C_{mai}$ 。公式为:

$$C = C_{pvm} + C_{inv} + C_{oth} + C_{mai} \times N - C_{sv}, \quad (1)$$

其中, $C$ 为总投资, $N$ 为使用年限, $C_{sv}$ 为固定资产残值。

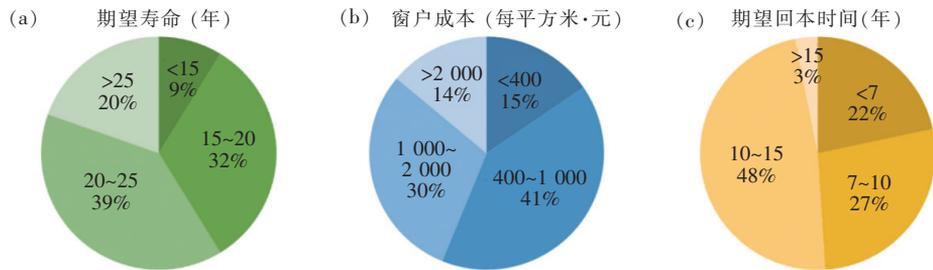


图8 居民对光伏型智能窗的期望寿命(a)、期望成本(b)、期望回本时间(c)。

Fig. 8 Residents' expectation of life(a), expected cost(b) and expected return time(c) of photovoltaic smart windows.

收益方面,主要包括“自发自用、余电上网”中上网的收入和因发电节省的电费,考虑到政策变化产生的影响,因此不把国家和地方政府的政策补贴计算在内。公式为:

$$E = (P_u \times B_u + P_o \times B_o) \cdot N, \quad (2)$$

其中, $E$ 为总收益, $P_u$ 为每年自用的电量, $P_o$ 为每年上网的电量, $B_u$ 为每千瓦时的市价电费, $B_o$ 为每千瓦时的上网收入, $N$ 为使用年限。

光伏型智能窗的年发电量方面,计算公式如下:

$$P = P_u + P_o, \quad (3)$$

$$P = R \times T \times A, \quad (4)$$

其中, $P$ 为每年发电量, $R$ 为太阳年总辐射量, $T$ 为光伏窗太阳能转换效率, $A$ 为光伏窗的面积。

下面以吉林省长春市为例,对光伏窗的成本进行核算。

目前,长春市的电价标准为:年用电量低于2 040 kWh, $B_u = 0.5250$ 元。按照国家发展改革委制定的集中式光伏发电指导价,吉林省0.4元/kWh,即 $B_o = 0.4$ 元。

据国家能源局发布的统计数据,2019年,城乡居民生活用电量为10 250亿千瓦时<sup>[59]</sup>;根据中国人口与发展研究中心的预测,2020年我国家庭户数量约为4.57亿<sup>[60]</sup>。经过计算,平均每户家庭每年用电量约为2 243 kWh。考虑到阴雨天气以及夜晚期间光伏窗发电大大降低,用户需使

用电网供电,因此 $P_u < 2 243$ ,为简化计算,令 $P_u = 2243 \times 60\%$ 。

长春市太阳年总辐射的观测值为4 941.793 3 MJ/m<sup>2</sup><sup>[61]</sup>,换算后为1 372.7 kWh/m<sup>2</sup>,即 $R = 1 372.7$  kWh/m<sup>2</sup>。

假设每年的维护成本 $C_{mai}$ 是光伏模块成本 $C_{pvm}$ 、逆变器成本 $C_{inv}$ 、线缆和支架等成本 $C_{oth}$ 和的2%,固定资产残值 $C_{sv}$ 每年减少 $C_{pvm}$ 、 $C_{inv}$ 、 $C_{oth}$ 和的5%,光伏窗面积 $A = 20$  m<sup>2</sup>(根据《绿色建筑评价标准》,在居住建筑中,20%的窗地面积比评分最高<sup>[62]</sup>,为计算方便,令 $A = 20$ ),光伏窗太阳能转换效率 $T$ 为20%(目前钙钛矿太阳能电池效率高达25.5%<sup>[40]</sup>,此处为简化计算,令 $T = 20\%$ )。

经过计算,当 $C_{pvm} + C_{inv} + C_{oth} = 33 779.2$ 元时,可以达到投资与收益的平衡。

## 5.3 光伏产业政策扶持

截至目前,全世界有超过10个国家或地区在分布式储能方面提供了补贴政策<sup>[63]</sup>,我国在近年来也大力支持光伏产业的发展。2020年4月,《关于2020年光伏发电上网电价政策有关事项的通知》中指出,在户用分布式光伏发电方面,补贴标准为0.08元/kWh<sup>[64]</sup>。除了国家补贴,各地也出台了相应的补贴扶持政策。在政策的利好下,光伏技术不断成熟,成本随之下降。因此,如图9所示,国家补贴也在逐年下调。可以预期在不久的将来,光伏发电将实现平价上网,让光伏技术走



图9 2017—2020年国家发展改革委制定的光伏发电上网电价

Fig.9 Feed-in tariff for photovoltaic power generation set by the National Development and Reform Commission from 2017 to 2020

进千家万户。

## 6 总 结

钙钛矿材料因其带隙可调、价格低廉、可大面积制备等特点,在半透明太阳能电池和光伏型智能窗领域均有着优秀的表现。制备光伏型智能窗的技术方法是十分多样的,本文介绍了使用钙钛矿材料制备光伏窗的最新进展,并对半透明钙钛矿太阳能电池的发展现状做了详细的说明,展现其可应用于光伏窗的良好性能;在较高透明度下功率转换效率依然出色、可制备成中性色、具有优秀的颜色调节能力。另外,我们从光伏窗成本的角度对其进行了分析,可以预见其广阔的商业前

景。但是,目前钙钛矿光伏型智能窗的研究领域内仍存在着一些问题亟需解决,归纳为以下几点:(1)钙钛矿热致变色光伏窗不同色态间的转换条件较为苛刻,在温度控制方面仍有待后续研究;(2)钙钛矿太阳能电池的长期稳定性较差,需加强对器件的封装,选择循环稳定性更好的材料;(3)钙钛矿电池中铅的毒性较大,应替换为其他无毒或低毒的材料,比如锡;(4)目前半透明钙钛矿太阳能电池的面积较小,不能达到窗户所需尺寸,需设计大面积适用的器件结构;(5)光伏窗中效率与透明度在一定程度上存在着取舍问题,后续的研究重点可放在探索吸收紫外光和红外光的新型材料上。

## 参 考 文 献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2019年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2020-02-28)[2020-10-06]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202002/t20200228\\_1728913.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202002/t20200228_1728913.html). National Bureau of Statistics. Statistical communique of the People's Republic of China on national economic and social development in 2019 [EB/OL]. (2020-02-28)[2020-10-06]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202002/t20200228\\_1728913.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202002/t20200228_1728913.html). (in Chinese)
- [2] 中国建筑节能协会. 2019中国建筑能耗研究报告 [J]. 建筑, 2020(7):30-39. China Association for Building Energy Conservation. 2019 China building energy consumption research report [J]. *Construct. Arch.*, 2020(7):30-39. (in Chinese)
- [3] 尹凡, 楚洪亮, 张建高, 等. 正交实验法分析外窗系统对建筑能耗的影响 [J]. 科技通报, 2009, 25(4):473-476. YIN F, CHU H L, ZHANG J G, et al.. The influence of window systems on energy consumption of public buildings using orthogonal experiment method [J]. *Bull. Sci. Technol.*, 2009, 25(4):473-476. (in Chinese)
- [4] LIU X F, CAO T M, YAO W Q, et al.. A freestanding electrochromic copolymer for multicolor smart window [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2020, 570:382-389.
- [5] WU W T, FANG H J, MA H L, et al.. Boosting transport kinetics of ions and electrons simultaneously by  $Ti_3C_2T_x$  (MX-ene) addition for enhanced electrochromic performance [J]. *Nano-Micro Lett.*, 2021, 13(1):20.
- [6] ZHANG H, TIAN Y H, WANG S, et al.. Highly stable flexible transparent electrode via rapid electrodeposition coating of

- Ag-Au alloy on copper nanowires for bifunctional electrochromic and supercapacitor device [J]. *Chem. Eng. J.*, 2020, 399:125075.
- [ 7 ] HU A Y,JIANG Z S,KUAI C G,*et al.*. Uncovering phase transformation, morphological evolution, and nanoscale color heterogeneity in tungsten oxide electrochromic materials [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2020,8(38):20000-20010.
- [ 8 ] LIANG R Q,LIU D M,SUN Y Y,*et al.*. Investigation of Mg-Y coated gasochromic smart windows for building applications [J]. *Build. Simul.*, 2019,12(1):99-112.
- [ 9 ] QI W Y,GAO G H,WU G M,*et al.*. Flexible gasochromic films with favorable high temperature resistance and energy efficiency [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2019,195:63-70.
- [10] ZHANG Y,TSO C Y,IÑIGO J S,*et al.*. Perovskite thermochromic smart window: advanced optical properties and low transition temperature [J]. *Appl. Energy*, 2019,254:113690-1-12.
- [11] YUAN M,YUAN L,HU Z Y,*et al.*. *In situ* spectroscopic ellipsometry for thermochromic CsPbI<sub>3</sub> phase evolution portfolio [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2020,124(14):8008-8014.
- [12] DANG U,ZAHEER W,ZHOU W Y,*et al.*. Lattice anharmonicity of stereochemically active lone pairs controls thermochromic band gap reduction of PbVO<sub>3</sub>Cl [J]. *Chem. Mater.*, 2020,32(17):7404-7412.
- [13] JOOST U,ŠUTKA A,OJA M,*et al.*. Reversible photodoping of TiO<sub>2</sub> nanoparticles for photochromic applications [J]. *Chem. Mater.*, 2018,30(24):8968-8974.
- [14] ANDRON I,MARICHEZ L,JUBERA V,*et al.*. Photochromic behavior of ZnO/MoO<sub>3</sub> interfaces [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020,12(41):46972-46980.
- [15] GRANQVIST C G,ARVIZU M A,PEHLIVAN I B,*et al.*. Electrochromic materials and devices for energy efficiency and human comfort in buildings: a critical review [J]. *Electrochim. Acta*, 2018,259:1170-1182.
- [16] ALONSO E,SHERMAN A M,WALLINGTON T J,*et al.*. Evaluating rare earth element availability: a case with revolutionary demand from clean technologies [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2012,46(6):3406-3414.
- [17] LAMPERT C M. Electrochromic materials and devices for energy efficient windows [J]. *Solar Energy Mater.*, 1984,11(1-2):1-27.
- [18] SVENSSON J S E M,GRANQVIST C G. Electrochromic tungsten oxide films for energy efficient windows [J]. *Solar Energy Mater.*, 1984,11(1-2):29-34.
- [19] 周骥才,黄穗阳. 无机电致变色材料研究的现状与展望 [J]. *硅酸盐通报*, 1989(4):32-40.  
ZHOU J C,HUANG S Y. The present situation and prospect of the research on inorganic electrochromic material [J]. *Bull. Chin. Ceram. Soc.*, 1989(4):32-40. (in Chinese)
- [20] SPACEAERO2. ANA Boeing 787-8 JA801A window electrochromism tinting system [EB/OL]. (2011-12-16) [2020-10-08]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ANA\\_Boeing\\_787-8\\_JA801A\\_window.jpg?uselang=zh-cn](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ANA_Boeing_787-8_JA801A_window.jpg?uselang=zh-cn).
- [21] 牛秀秀,田铎,陈棋. 太阳能电池的明天 [J]. *物理*, 2018,47(3):143-151.  
NIU X X,TIAN D,CHEN Q. Photovoltaics of the future: perovskite solar cells [J]. *Physics*, 2018,47(3):143-151. (in Chinese)
- [22] GREEN M A,DUNLOP E D,HOHL-EBINGER J,*et al.*. Solar cell efficiency tables (Version 55) [J]. *Prog. Photovoltaics*, 2020,28(1):3-15.
- [23] LIU F,ZHOU Z C,ZHANG C,*et al.*. Efficient semitransparent solar cells with high NIR responsiveness enabled by a small-bandgap electron acceptor [J]. *Adv. Mater.*, 2017,29(21):1606574-1-7.
- [24] ZHANG K,QIN C J,YANG X D,*et al.*. High-performance, transparent, dye-sensitized solar cells for see-through photovoltaic windows [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2014,4(11):1301966-1-7.
- [25] XUE Q F,BAI Y,LIU M Y,*et al.*. Dual interfacial modifications enable high performance semitransparent perovskite solar cells with large open circuit voltage and fill factor [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2017,7(9):1602333-1-9.
- [26] 梁启超,乔芬,杨健,等. 太阳能电池的研究现状与进展 [J]. *中国材料进展*, 2019,38(5):505-511.  
LIANG Q C,QIAN F,YANG J,*et al.*. Present research status and progress of solar cells [J]. *Mater. China*, 2019,38(5):505-511. (in Chinese)
- [27] 尚修顿. 有机太阳能电池的发展概论 [J]. *价值工程*, 2020,39(3):254-256.  
SHANG X J. Introduction to the development of organic solar cells [J]. *Value Eng.*, 2020,39(3):254-256. (in

Chinese)

- [28] 秦昱,林珍华,常晶晶,等. 印刷钙钛矿太阳能电池研究进展 [J]. 中国光学, 2019,12(5):1015-1027.  
QIN Y, LIN Z H, CHANG J J, *et al.*. Research progress of printed perovskite solar cells [J]. *Chin. Opt.*, 2019,12(5):1015-1027. (in Chinese)
- [29] EPERON G E, BURLAKOV V M, GORIELY A, *et al.*. Neutral color semitransparent microstructured perovskite solar cells [J]. *ACS Nano*, 2014,8(1):591-598.
- [30] KWON H C, MA S, YUN S C, *et al.*. A nanopillar-structured perovskite-based efficient semitransparent solar module for power-generating window applications [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2020,8(3):1457-1468.
- [31] CHEN C, HAN T H, TAN S, *et al.*. Efficient flexible inorganic perovskite light-emitting diodes fabricated with CsPbBr<sub>3</sub> emitters prepared *via* low-temperature *in situ* dynamic thermal crystallization [J]. *Nano Lett.*, 2020,20(6):4673-4680.
- [32] 刘娜,樊哲一,任杰灵,等. 蒸汽辅助溶液过程制备钙钛矿材料及钙钛矿太阳能电池 [J]. 中国光学, 2017,10(5):568-577.  
LIU N, FAN Z Y, REN J L, *et al.*. Preparation of perovskite materials and perovskite solar cells by vapor-assisted solution process [J]. *Chin. Opt.*, 2017,10(5):568-577. (in Chinese)
- [33] 王熹,赵志国,秦校军,等. 基于喷涂法制备氧化锡薄膜的钙钛矿太阳能电池 [J]. 中国光学, 2019,12(5):1040-1047.  
WANG X, ZHAO Z G, QIN X J, *et al.*. Perovskite solar cells based on a spray-coating tin oxide film [J]. *Chin. Opt.*, 2019,12(5):1040-1047. (in Chinese)
- [34] XIA X H, KU Z L, ZHOU D, *et al.*. Perovskite solar cell powered electrochromic batteries for smart windows [J]. *Mater. Horiz.*, 2016,3(6):588-595.
- [35] ZHOU F C, REN Z W, ZHAO Y D, *et al.*. Perovskite photovoltachromic supercapacitor with all-transparent electrodes [J]. *ACS Nano*, 2016,10(6):5900-5908.
- [36] WHEELER L M, MOORE D T, IHLY R, *et al.*. Switchable photovoltaic windows enabled by reversible photothermal complex dissociation from methylammonium lead iodide [J]. *Nat. Commun.*, 2017,8(1):1722-1-9.
- [37] LIN J, LAI M L, DOU L T, *et al.*. Thermochromic halide perovskite solar cells [J]. *Nat. Mater.*, 2018,17(3):261-267.
- [38] XIA Y, LIANG X, JIANG Y, *et al.*. High-efficiency and reliable smart photovoltaic windows enabled by multiresponsive liquid crystal composite films and semi-transparent perovskite solar cells [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2019,9(33):1900720-1-8.
- [39] SHEN L, YIP H L, GAO F, *et al.*. Semitransparent perovskite solar cells for smart windows [J]. *Sci. Bull.*, 2020,65(12):980-982.
- [40] EOM T, KIM S, AGBENYEKE R E, *et al.*. Copper oxide buffer layers by pulsed-chemical vapor deposition for semitransparent perovskite solar cells [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2020,doi:10.1002/admi.202001482.
- [41] RAHMANY S, ETGAR L. Semitransparent perovskite solar cells [J]. *ACS Energy Lett.*, 2020,5(5):1519-1531.
- [42] GASPERA E D, PENG Y, HOU Q C, *et al.*. Ultra-thin high efficiency semitransparent perovskite solar cells [J]. *Nano Energy*, 2015,13:249-257.
- [43] XIAO S, CHEN H N, JIANG F Y, *et al.*. Hierarchical dual-scaffolds enhance charge separation and collection for high efficiency semitransparent perovskite solar cells [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2016,3(17):1600484-1-7.
- [44] UPAMA M B, MAHMUD M A, YI H M, *et al.*. Low-temperature processed efficient and colourful semitransparent perovskite solar cells for building integration and tandem applications [J]. *Organic Electron.*, 2019,65:401-411.
- [45] DOKKHAN C, MOKHTAR M Z, KE C R, *et al.*. Modulating crystallization in semitransparent perovskite films using sub-micrometer spongelike polymer colloid particles to improve solar cell performance [J]. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2019,2(9):6624-6633.
- [46] HEO J H, JANG M H, LEE M H, *et al.*. Efficiency enhancement of semi-transparent sandwich type CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite solar cells with island morphology perovskite film by introduction of polystyrene passivation layer [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2016,4(42):16324-16329.
- [47] WANG Y S, MAHMOUDI T, YANG H Y, *et al.*. Fully-ambient-processed mesoscopic semitransparent perovskite solar cells by islands-structure-MAPbI<sub>3-x</sub>Cl<sub>x</sub>-NiO composite and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NiO interface engineering [J]. *Nano Energy*, 2018,49:

59-66.

- [48] HÖRANTNER M T, ZHANG W, SALIBA M, *et al.*. Templated microstructural growth of perovskite thin films *via* colloidal monolayer lithography [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2015, 8(7):2041-2047.
- [49] KWON H C, KIM A, LEE H, *et al.*. Parallelized nanopillar perovskites for semitransparent solar cells using an anodized aluminum oxide scaffold [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2016, 6(20):1601055-1-11.
- [50] RAI M, RAHMANY S, LIM S S, *et al.*. Hot dipping post treatment for improved efficiency in micro patterned semi-transparent perovskite solar cells [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2018, 6(46):23787-23796.
- [51] LIU G H, WU C C, ZHANG Z H, *et al.*. Ultraviolet-protective transparent photovoltaics based on lead-free double perovskites [J]. *Solar RRL*, 2020, 4(5):2000056.
- [52] KO Y, KIM Y, LEE C, *et al.*. Poly(methyl methacrylate) embedded perovskite films for improving solar cell performance [J]. *Synth. Met.*, 2019, 249:47-51.
- [53] LI C, SLEPPY J, DHASMANA N, *et al.*. A PCBM-assisted perovskite growth process to fabricate high efficiency semitransparent solar cells [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2016, 4(30):11648-11655.
- [54] BELLIA L, BISEGNA F, SPADA G. Lighting in indoor environments: visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions [J]. *Build. Environ.*, 2011, 46(10):1984-1992.
- [55] KIM G M, TATSUMA T. Semi-transparent perovskite solar cells developed by considering human luminosity function [J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7(1):10699.
- [56] CANNAVALE A, EPERON G E, COSSARI P, *et al.*. Perovskite photovoltachromic cells for building integration [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2015, 8(5):1578-1584.
- [57] 黄亚峰, 毕大伟, 李苑红. 基于 LCOE 原理家庭式光伏度电成本分析 [J]. 东北电力大学学报, 2019, 39(3):1-7.  
HUANG Y F, BI D W, LI Y H. Analysis of family PV power cost based on LCOE principle [J]. *J. Northeast Dianli Univ.*, 2019, 39(3):1-7. (in Chinese)
- [58] 应莉, 周洁. 基于成本收益的居民分布式光伏度电补贴测算 [J]. 中国市场, 2019(15):32-34.  
YING L, ZHOU J. Cost-benefit based subsidy calculation of residential distributed photovoltaic power [J]. *China Market*, 2019(15):32-34. (in Chinese)
- [59] 国家能源局. 国家能源局发布 2019 年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2020-01-20)[2020-10-06]. [http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c\\_138720881.htm](http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c_138720881.htm).  
National Energy Administration. The National Energy Administration released statistics on the national power industry for 2019 [EB/OL]. (2020-01-20)[2020-10-06]. [http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c\\_138720881.htm](http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c_138720881.htm). (in Chinese)
- [60] 国家卫生和计划生育委员会. 中国家庭发展报告 2014 [M]. 北京: 中国人口出版社, 2014.  
National Health and Family Planning Commission. *China Family Development Report 2014* [M]. Beijing: China Population Publishing House, 2014. (in Chinese)
- [61] 于秀晶, 胡轶鑫, 梁洪海, 等. 吉林省太阳能资源及其利用区划的探讨 [J]. 吉林气象, 2008(3):29-31.  
YU X J, HU Y X, LIANG H H, *et al.*. Discussion on solar energy resources and its utilization regionalization in Jilin Province [J]. *Jilin Meteor.*, 2008(3):29-31. (in Chinese)
- [62] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于发布国家标准《绿色建筑评价标准》的公告 [EB/OL]. (2014-04-15)[2020-11-28]. [http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201508/t20150829\\_224219.html](http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201508/t20150829_224219.html).  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Announcement of the ministry of housing and urban-rural development on issuing the national standard "green building evaluation standard" [EB/OL]. (2014-04-15)[2020-11-28]. [http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201508/t20150829\\_224219.html](http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201508/t20150829_224219.html). (in Chinese)
- [63] 宋安琪, 武利会, 刘成, 等. 分布式储能发展的国际政策与市场规则分析 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1):306-316.  
SONG A Q, WU L H, LIU C, *et al.*. Analysis of global distributed energy storage development policies and market rules [J]. *Energy Storage Sci. Technol.*, 2020, 9(1):306-316. (in Chinese)
- [64] 国家发展改革委. 关于 2020 年光伏发电上网电价政策有关事项的通知 [EB/OL]. (2020-04-02)[2020-10-06]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202004/t20200402\\_1235942.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202004/t20200402_1235942.html).  
National Development and Reform Commission. Notice concerning the feed-in tariff policy for photovoltaic power generation

in 2020 [EB/OL]. (2020-04-02) [2020-10-06]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202004/t20200402\\_1235942.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202004/t20200402_1235942.html). (in Chinese)



姜欣(1994-),女,吉林四平人,硕士研究生,2016年于大连民族大学获得学士学位,主要从事钙钛矿光伏型智能窗方面的研究。

E-mail: jxjiangxin@outlook.com



段羽(1978-),男,吉林长春人,博士,教授,2006年于吉林大学获得博士学位,主要从事柔性透明导电电极、光电子器件薄膜封装、有机电致发光器件、钙钛矿光伏及照明、智能窗系统及水汽透过测试系统等方面的研究。

E-mail: duanyu@jlu.edu.cn



姜文龙(1963-),男,吉林公主岭人,博士,教授,2005年于吉林大学获得博士学位,主要从事有机电致发光器件的研究。

E-mail: jiang\_wl@163.com