

太阳能电池综述：材料、政策驱动机制及应用前景

曹邵文 周国庆 蔡琦琳 叶庆 庞昊强 吴玺

A review of solar cells: Materials, policy-driven mechanisms and application prospects

CAO Shaowen, ZHOU Guoqing, CAI Qilin, YE Qing, PANG Haoqiang, WU Xi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220302.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

(PEDOT-PSS)-碳纳米管复合膜硅基太阳能电池

(PEDOT-PSS)-carbon nanotubes composite films for Si solar cells

复合材料学报. 2017, 34(11): 2385-2391 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170228.001>

基于气体基压电复合材料的线聚焦空耦超声传感器研制与应用

Design and application of line-focus air-coupled ultrasonic transducer based on air-based piezoelectric composites

复合材料学报. 2018, 35(3): 653-660 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170601.008>

MOFs及衍生复合材料在锂硫电池中的设计应用

Design and application of MOFs and derived composite materials in lithium-sulfur batteries

复合材料学报. 2021, 38(10): 3192-3207 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210427.001>

水泥基复合材料热电效应综述：机制、材料、影响因素及应用

A review of thermoelectric effect of cement-based composites: Mechanism, material, factor and application

复合材料学报. 2020, 37(9): 2077-2093 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200423.002>

沥青基软碳材料对硅负极锂离子电池性能的影响

Effect of asphalt-decomposed soft carbon on the performance of Si-based anode material in lithium ion battery

复合材料学报. 2019, 36(6): 1568-1573 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180821.004>

Ti基MXene及其复合材料在金属离子电池中的进展

Research progress of Ti-based MXene and its composites in metal-ion batteries

复合材料学报. 2020, 37(12): 2984-3003 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200717.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220302.001

太阳能电池综述：材料、政策驱动机制及应用前景



分享本文

曹邵文, 周国庆, 蔡琦琳*, 叶庆, 庞昊强, 吴玺*
(苏州大学 能源学院, 苏州 215006)

摘要：太阳能是清洁无污染的可再生能源，对其进行高效开发利用是推进国家“双碳”工作的重要举措。利用光伏电池将太阳能转化为电能是利用太阳能的重要方式之一。本论文总结了光伏电池材料的研究进展、行业政策与商业模式及发展应用前景。首先，阐述了各类光伏电池的效率、成本、优缺点及应用场景受材料因素的影响，并结合最新的研究进展分析了各类光伏电池未来的发展方向。其次，结合光伏产业的商业模式及扶持政策，探讨光伏电池材料及产业发展受政策驱动机制的影响。最后，以光伏电池材料的研究进展及光伏产业的发展方向为基础，对该领域进行了总结与展望，分析在“双碳”愿景下光伏产业如何助力国家“双碳”工作。

关键词：碳中和；太阳能电池；分布式光伏；电池材料；效率；光伏产业

中图分类号：TM914.4 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-3851(2022)05-1847-12

A review of solar cells: Materials, policy-driven mechanisms and application prospects

CAO Shaowen, ZHOU Guoqing, CAI Qilin*, YE Qing, PANG Haoqiang, WU Xi*
(College of Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Solar energy is a clean and pollution-free renewable energy, and its efficient development and utilization can significantly promote national “dual carbon” work. Using photovoltaic cells to convert solar energy into electricity is one of the ways to use solar energy. In this review, the research progress, industry policies, business models and development and application prospects of photovoltaic cell materials were summarized. First of all, the efficiency, cost, advantages and disadvantages of various photovoltaic cells and the impact of material factors on application scenarios were clarified, and combined with the latest research progress, the future development direction of various photovoltaic cells was analyzed. Secondly, combined with the business model and supporting policies of the photovoltaic industry, the influence of policy driving mechanisms on the development of photovoltaic cell materials and industry was discussed. Finally, based on the research progress of photovoltaic cell materials and the development direction of the photovoltaic industry, this field was summarized and prospected. The way that photovoltaic industry contributes to the national “dual carbon” work under the “dual carbon” vision was analyzed.

Keywords: carbon neutral; solar cells; distributed photovoltaic; cell material; efficiency; photovoltaic industry

2020 年 9 月，中国提出“碳达峰、碳中和”（下称“双碳”）目标，即我国通过发展新能源技术、碳移除技术以及节能减排技术，来抵消人类活动产生的碳排放量，最终达到相对“零排放”状态。我国“十四五”的重点任务之一便是做好“双碳”工作。其中，实现“双碳”目标的重要一环便是变革能源来源及其利用方式。太阳能是可再生能源，具有清洁、无污染和分布广泛等优

收稿日期：2021-11-17；修回日期：2022-01-17；录用日期：2022-02-19；网络首发时间：2022-03-06 14:37:43
网络首发地址：<https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220302.001>
通信作者：蔡琦琳，博士，硕士生导师，研究方向为太阳能高效利用 E-mail: qlcai@suda.edu.cn；
吴玺，博士，硕士生导师，研究方向为太阳能高效利用 E-mail: wuxi@suda.edu.cn
引用格式：曹邵文, 周国庆, 蔡琦琳, 等. 太阳能电池综述：材料、政策驱动机制及应用前景 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(5): 1847-1858.
CAO Shaowen, ZHOU Guoqing, CAI Qilin, et al. A review of solar cells: Materials, policy-driven mechanisms and application prospects[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(5): 1847-1858(in Chinese).

点, 对其高效开发利用是解决当前能源和环境问题的关键措施。光伏电池是一种通过光电效应直接将太阳能转化成电能的装置, 具有广阔的发展和应用前景^[1-4]。

为研发出高效率低成本的光伏电池, 推广太阳能利用, 光伏技术不断更新发展, 光伏电池材料的种类也越来越多, 大致可按其材料结构分为以下三类: ①硅基光伏电池: 单晶硅、多晶硅光伏电池等。②薄膜光伏电池: 砷化镓、碲化镉、铜铟镓硒薄膜光伏电池等。③新型光伏电池: 具有理论高转化效率以及低成本优势的新概念电池, 主要有染料敏化光伏电池、钙钛矿光伏电池、有机太阳电池以及量子点太阳电池等。本文首先梳理了目前光伏电池材料的研究进展, 对比分析了它们的优缺点以及主要发展趋势, 随后从“碳中和”的角度出发, 阐述目前光伏扶持政策以及产业商业模式, 最后展望了“双碳”目标下光伏产业的应用前景。

1 光伏电池的研究进展

1.1 硅基光伏电池

硅基光伏电池以硅材料为基础, 主要包括单晶硅光伏电池和多晶硅光伏电池。单晶硅在硅基光伏电池中效率是最高的, 在实验室中, 单晶硅光伏电池的转换效率达到了 26.7%^[5], 但受到材料价格及繁琐制备工艺的影响, 导致单晶硅成本价格居高不下, 不利于市场推广应用。因此, 研究者不得不寻找新的低成本光伏电池材料予以替代。

于是, 制作成本占优的多晶硅光伏电池很快进入人们的视野。多晶硅是单质硅的一种形态, 熔融的单质硅在过冷条件下凝固时, 硅原子以金刚石晶格形态排列成许多晶核, 这些晶核长成晶面取向不同的晶粒结合起来, 就结晶成多晶硅。多晶硅光伏电池制备工艺与单晶硅较为相似, 但制作成本上却低很多。目前, 多晶硅光伏电池实验室最高转化效率由阿斯特公司的德国 ISFH 研究所报道, 测试结果为 22.8%^[6]。然而, 光伏市场实际使用的多晶硅光伏电池转化效率在 18% 左右, 明显低于单晶硅光伏电池, 这也成为阻碍多晶硅光伏电池发展的重要原因。

值得注意的是, 由于传统的单晶硅太阳电池具有使用寿命长、制备工艺完善以及转化效率高的优点, 尽管其工艺成本占电池组件总成本的 30%, 但其仍是光伏市场的主导产品。为了降低

其成本, 近年来, 将复合材料膜与硅基光伏电池结合的研究进入人们的视野, 复合透明膜的引入可增加硅电池表面对光的吸收, 相比于传统硅电池, 这类杂化电池的制备工艺大为简化, 有望大幅度降低硅基光伏电池的成本^[7]。

因此, 对于硅基光伏电池来说, 提升效率的关键是增加电池对光的吸收率及减小电池表面复合。近年来, 钝化发射极背部局域扩散电池 (Passivated emitter and rear locally-diffused, PERL)、全背电极接触晶硅太阳电池 (Interdigitated back contact, IBC)、晶体硅异质结太阳能电池 (Heterojunction with intrinsic thin layer, HIT)、交叉指式背接触异质结 (HIT+IBC, HBC) 等电池结构的提出, 使硅基光伏电池的实验室转化效率接近 Shockley-Queisser 极限, 但是硅基光伏电池的制备成本却居高不下, 如何简化制备工艺, 降低电池制备成本成为硅基光伏电池新的研究方向。未来可结合成本更低的薄膜工艺, 将硅基光伏电池与钙钛矿薄膜材料结合起来, 研制新型的异质结结构电池。同时, 也可将硅与新型材料结合, 如利用石墨烯载流子移动速度较快且在可见波段有极高的透光率的特点, 将石墨烯与硅光伏电池结合起来, 形成新的硅基肖特基结光伏电池, 使制备工艺简化, 制备成本降低。

1.2 薄膜光伏电池

薄膜光伏电池是继硅基光伏电池后出现的新一代光伏电池, 与硅基光伏电池相比薄膜光伏电池用料更少, 且理论上也具有更高转化效率。在“双碳”愿景下, 推广光伏建筑一体化 (Building integrated photovoltaic, BIPV) 是重要举措, 而薄膜光伏电池具有半透明和柔性的特点 (图 1) 能够很好地满足光伏建筑的需求。目前, 薄膜光伏电池主要产品包括: 碲化镉光伏电池 (CdTe)、铜铟镓硒薄膜光伏电池 (CIGS)、砷化镓光伏电池 (GaAs) 等。

CdTe 薄膜光伏电池是近年来发展较快, 其主要优势是性能稳定、制造成本低并且其大规模运行效率高于非晶硅光伏电池, 具有非常诱人的发展前景^[9]。目前已有位于杭州市的综合能源生产调度中心使用 CdTe 电池作为发电建材, 以太阳能作为基础能源供大楼日常使用^[10]。然而, CdTe 薄膜光伏电池中的 Te 元素是稀有元素, 天然储量是有限的, 目前主要发展趋势是通过降低薄膜厚

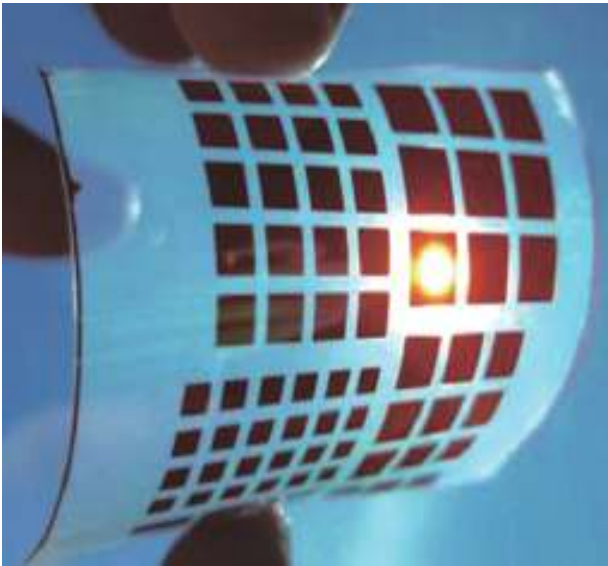


图 1 柔性半透明电池实物图^[6]

Fig. 1 Physical map of flexible translucent battery^[6]

度来减少 Te 元素的使用。此外，Cd 元素是有毒元素，需要有相应的回收措施来减少电池对环境的污染。

由于 CdTe 电池的毒性问题难以解决，且电池本身的光电转化效率也需要进一步提高，所以 CIGS 薄膜光伏电池进入了人们的视野。该电池有很多优点，一是轻量化，便于光伏电池的安装；二是弱光性能优越；三是可以制作成各种颜色，可以大面积应用在光伏建筑一体化上；四是其光电转化效率也较高，目前实验室效率已经达到 23.4%^[11]。然而，CIGS 电池在产业化进程中也遇到阻碍，制造工艺较为复杂导致前期投资成本过高。需要指出的是，该电池中关键材料 In 元素是全世界较为稀缺的材料，但我国 In 元素储量全球第一，为我国发展 CIGS 电池提供良好的材料基础。因此，CIGS 电池也是我国光伏产业重点发展的光伏电池种类。为使 CIGS 电池能够助力“碳中和”，实现产业化，目前的研究方向主要是努力消除电池的各种损耗对效率的影响。因此，该电池未来的发展趋势主要是：一是替换电池的镉缓冲层，由于目前 CIGS 电池的缓冲层是 CdS，具有毒性，未来需要发展其他材料替换 CdS；二是采用低成本的吸收层；三是构建叠层电池体系，形成多结电池，理论上可以大大提高电池的效率；四是采用柔性衬底，为光伏建筑一体化的推广奠定基础。目前，我国已经有 CIGS 薄膜光伏电池光伏建筑一体化的应用，如图 2 所示，苏州同里



图 2 苏州同里湖嘉苑汉瓦屋顶项目

Fig. 2 Tongli lake jiayuan hanwa roof project in Suzhou

综合能源服务中心屋顶项目就是采用的 CIGS 薄膜光伏电池，该建筑应用光伏技术、储能技术以及智能家居系统实现了“零能耗”。

最后，GaAs 光伏电池是目前光电转化效率最高的光伏电池，三结 GaAs 薄膜光伏电池的效率已经达到了 37.9%，该记录由日本 Sharp 公司研发的倒装型电池创下^[12]。GaAs 光伏电池的优势除了高光电转化效率外，还有个优势是耐高温性能好，在 200℃ 以上硅电池基本不能工作，但 GaAs 电池可以正常工作。但其缺点也十分明显，除了成本高昂，还有机械性能较差，较难加工。现阶段，由于 GaAs 电池的造价是普通硅基光伏电池的数倍，很难做到大面积推广应用，主要是用在空间卫星、无人飞行器及概念汽车上，在民用消费领域还较少。相比于 CIGS、CdTe 薄膜光伏电池，GaAs 光伏电池的优势十分明显，即效率更高，稳定性更好，但是其高昂的成本使其市场竞争力较低，这也是该电池未来亟需解决的问题。

BIPV 的应用已经持续了很长一段时间，但仍没有大规模应用。其中一个原因就是建筑技术和光伏发电技术是完全不同的两个理念。传统硅基材料电池由于没有柔性半透明的特点，利用硅基材料的光伏电池技术无法与建筑设计的美观理念结合在一起，但是薄膜光伏电池材料的出现为建筑技术和光伏发电技术的有机结合提供了可能，使 BIPV 建筑绿色低碳且不牺牲美观度。同时薄膜光伏电池材料还可以应用在车顶、车身等更多领域，从而大量减少碳排放，助力我国“双碳”工作。

未来为推广薄膜光伏电池的应用，需要降低电池的成本。例如，可以使用更便宜的元素代替

原先薄膜光伏电池中较为昂贵的元素，如有学者将 CIGS 电池中昂贵的 In 和 Ga 用 Zn 和 Sn 取代，从而降低电池的成本^[11]。此外，还可以结合硅基光伏电池已有的技术，采用杂化、掺杂元素的方式保证电池性能的同时，简化电池的制备流程，降低电池的制备成本。

1.3 新型光伏电池

硅基光伏电池以及薄膜光伏电池材料的有些应用缺陷短期内很难解决，研究人员试图找到新的材料来推进光伏电池产业化进程，于是新型光伏电池进入研究人员的视野，新型光伏电池的主要特点是：薄膜化、理论转化效率高、原料丰富、无毒性，目前较为热门的新型光伏电池有：染料敏化电池和钙钛矿电池等。

染料敏化光伏电池 (Dye-sensitized solar cells, DSSCs) 实际上是模仿光合作用原理而研制出的一种新型的光电化学电池，是人们在探索电池制备新工艺、新材料和电池薄膜化过程中发展起来的一种新型光伏器件^[13]。图 3 给出了染料敏化光伏电池的结构示意图。典型的 DSSCs 主要由 5 个主要部分组成，分别是导电玻璃(镀有透明导电膜)、多孔半导体薄膜(纳米 TiO₂)、染料敏化剂、电解质和对电极。目前 DSSCs 的最高转化效率仅为 13%，由 EPFL 所报道^[14]。研究人员利用界面修饰、纳米结构调控、离子掺杂以及不同材料复合等方法获得较大的比表面积，增加对染料吸附，从而提高捕光能力以提高电池的光电转化效率。由于染料敏化电池的 Pt 电极价格昂贵，增加了染料敏化电池的生产成本，于是有研究人员发现可利用

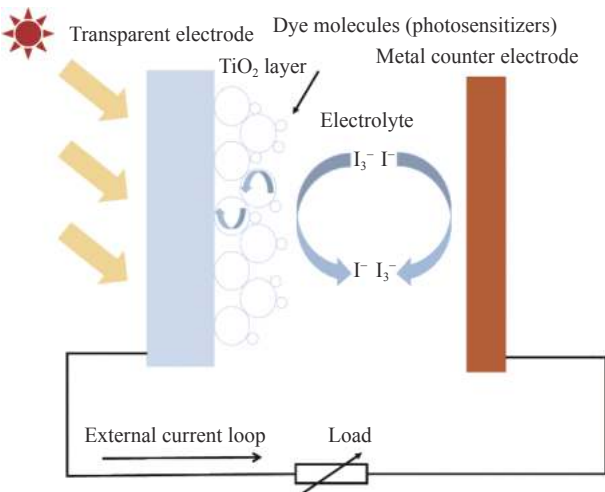


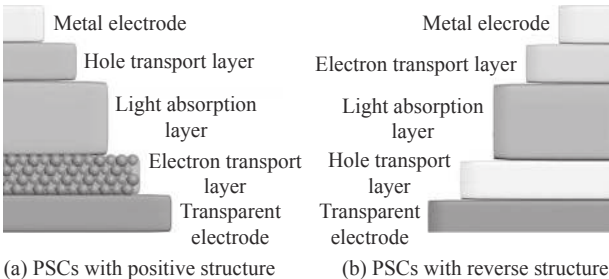
图 3 染料敏化光伏电池结构^[17]

Fig. 3 Structure of dye-sensitized solar cells (DSSCs)^[17]

碳材料代替 Pt 金属电极，以降低电池制备成本^[15]。此外，也有研究者将 ZnO 纳米花与 TiO₂ 复合涂覆到透明电极以提高电池转化效率^[16]。除了转化效率和成本问题，电池的稳定性问题也需要得到重视，目前大多数 DSSCs 采用液态电解质以提高电池效率，但是液态电解质有易泄漏、稳定性差的缺陷，限制了该电池的产业化发展。

另外，还有一种新型光伏电池是钙钛矿光伏电池 (Perovskite solar cells, PSCs)，该电池是目前新型光伏电池中的研究热门。PSCs 的效率高于 DSSCs，而且其制备成本远低于传统的硅基光伏电池，具有诱人的发展前景^[18]。如图 4 所示，PSCs 的基本构造通常为透明电极/电子传输层/光吸收层/空穴传输层/金属阴极^[19]。2009 年日本桐荫横滨大学 Miyasaka 课题组以甲胺铅碘为吸光材料研制了钙钛矿光伏电池，报道的效率仅为 3.8%^[20]。为进一步提高钙钛矿电池的光电转化效率，研究者们还在电池的薄膜制备工艺、载流子输送界面层设计、掺杂材料的选择以及电池器件结构设计方面进行进一步研究。经不断发展，韩国科学技术高等研究院、首尔大学以及美国国家可再生能源实验室共同研究，2020 年将 PSCs 电池最高效率提升至 26.7%^[21]。目前，钙钛矿电池的最大的劣势是材料不稳定，钙钛矿电池中的有机阳离子易挥发，从而导致钙钛矿分解。于是，具有超高的湿度稳定性二维卤代物钙钛矿引起了各国研究者的注意^[22]。二维钙钛矿电池是一种非常具有发展前景的钙钛矿电池形态，其独特的可调性可以用来解决一系列钙钛矿电池的光照稳定性、水氧稳定性问题。除此以外，刘海潮等^[23]将生物质多孔碳材料应用于钙钛矿电池以提升电池效率，该项工作不仅可以降低生物质碳材料的制备成本，同时也可加速 PSCs 的商品化进程。

随着研究人员的不断努力，新型光伏电池尤



(a) PSCs with positive structure (b) PSCs with reverse structure

图 4 平面结构钙钛矿电池 (PSCs) 结构示意图^[19]

Fig. 4 Schematic diagram of planar perovskite cell (PSCs) structure^[19]

其是钙钛矿光伏电池的性能不断提升，并且其转化效率已经可以媲美传统硅基光伏电池，但是其稳定性的问题仍然制约着其商业化的发展，未来可将钙钛矿材料与多种材料如石墨烯、多孔碳等进行复合，或尝试不同的材料形态，以提高电池的稳定性。

1.4 各类光伏电池的对比

从目前全球光伏市场来看，单晶硅以及多晶硅电池因具较高性价比，仍然占市场主体。然而，薄膜光伏电池或新型光伏电池由于其较高的理论

转化效率和较低的制备成本也突显出诱人的发展前景。[表 1](#) 为各类主要光伏电池的对比，从“碳中和”应用角度出发，对比分析它们的转化效率、优缺点、成本以及主要应用场景。虽然目前新型光伏电池种类繁多，其中已经能够产业化并且应用到民用领域的光伏电池只有钙钛矿光伏电池。从表中对比可看出，每种光伏电池都有各自的应用场景，仍未有一款完美的光伏电池同时做到高效低成本。为实现“30-60”目标，仍需大力发展高效率 and 低制备成本的光伏电池。

表 1 各类光伏电池对比
Table 1 Comparison of various photovoltaic cells

Cell types	Conversion efficiency	Advantages	Disadvantage	Applicable scenario	Cost (Cells)
Monocrystalline silicon photovoltaic cells	24.2% ^[6]	Mature technology	High cost	Photovoltaic power station, etc.	1.04-1.12 Yuan/W
Polycrystalline silicon photovoltaic cells	22.8% ^[24]	Mature technology	Low efficiency	Photovoltaic power station, etc.	0.73-0.83 Yuan/W
Silicon-based thin film photovoltaic cells	11.9% ^[25]	Translucent, flexible substrate	Low efficiency	BIPV application etc.	4.54 Yuan/W (Mitsubishi heavy industries)
Copper indium gallium Selenium thin film photovoltaic cell(CIGS)	23.4% ^[26]	Lightweight; Low light performance is good	Contains the rare element In	BIPV application etc.	5 Yuan/W
Cadmium telluride thin film photovoltaic cell(CdTe)	22.1% ^[27]	Stable performance	Component rarity	BIPV application etc.	4.6 Yuan/W (First solar)
Gallium arsenide thin film photovoltaic cell(GaAs)	35.5% ^[12]	High efficiency; High temperature and radiation resistance	High cost	Aerospace engineering	38 Yuan/W
Dye-sensitized thin film photovoltaic cells(DSSC)	11.7% ^[13]	Long cell life; Simple structure	Liquid electrolyte is volatile; Poor stability	In the lab	—
Perovskite photovoltaic cells(PSCs)	26.7% ^[28]	Low cost; Abundant raw materials	Short life	BIPV application etc.	1 Yuan/W (Golden concord nano)

在“碳中和”愿景下，需要大力发展新型光伏电池，然而，新型光伏电池属于发展较晚的电池种类，其电池技术也一直在进步，国内外研究人员一直在积极地推动新型光伏电池的产业化进程。如[表 2](#) 所示，为目前部分国内外新型光伏电池的研究进展。评估一种光伏电池是否有应用前景，其光电转化效率是一个重要衡量标准。除了要保证电池的转化效率外，电池的工作稳定性也是目前光伏电池研究的重要方向之一，目前为了提高钙钛矿电池的稳定性主要有两种基本思路：一是从钙钛矿电池材料出发，抑制材料在使用过程中产生分解；二是采用合适的电池封装技术，阻碍电池与外界环境发生反应。电池材料的环境友好性是决定一种光伏电池能否大规模应用的又一重要因素。研究人员主要改进方向有两种：一

是彻底替换原先的有害元素^[29]；二是利用掺杂的手段，降低原先有毒元素的毒性。电池大面积制备技术是能否实现新型光伏电池产业化的最后一步。目前，很多新型光伏电池制备技术只能满足实验室研究使用，无法满足大规模工业化生产所需的大面积以及低成本的要求。因此，目前对于大面积制备技术的主要研究方向是如何保障电池效率没有因为大面积量产而降低并且是低成本的制造工艺。

2 光伏产业的商业模式及相关扶持政策

2.1 商业模式

为推进光伏产业发展，健康、高效的商业模式必不可少。目前，在光伏产业中，集中式光伏发电模式在光伏发电量中占有绝对的主导地位，

表 2 国内外新型太阳能电池研究进展

Table 2 Research progress of new solar cells at home and abroad

Types	Time and authors	Description	Efficiency
Perovskite photovoltaic cells	2019 HU Jingsong ^[30]	The invention relates to a perovskite solar cell coated with a perovskite precursor by an air knife	19%
	2018 ZHAO Qin ^[31]	Perovskite polycrystalline films with larger grains and lower defect density were obtained by using cesium chloride enhanced lead iodide precursor solution two-step method	22.1%
	2018 PAN Xu ^[14]	Introduction of mixed cation perovskite cells	19.94%
	2018 WANG Zhaokui ^[32]	Ternary Pb-Sn-Cu perovskite solar cell	21.08%
	2021 JACKI Jeong ^[21]	An anionic engineering technique was developed to improve the crystallinity of thin films	26.7%
Dye-sensitized solar cells	2018 ZHU Weihong ^[33]	Structurally stable and efficient dye-sensitized cells with additional auxiliary receptors	11.7%
	2019 YUMA Kurumisawa ^[34]	The team achieved high conversion efficiency with the help of a new dye molecule (DfZnP- <i>i</i> Pr)	10.7%
Organic solar cell	2018 LI Yongfang ^[35]	PTQ10, a low-cost and efficient polymer donor material, is a simple D-A copolymer	12.7%
	2021 ZHANG Tao ^[36]	PB2F was added to the PBDB-TF: BTP-EC9 blend as the third component	18.6%
Quantum dot solar cells	2018 MA Wangli ^[37]	A solvent-processable quantum dot solar cell was prepared by using polymer hole transport materials	13%

大型光伏电站的商业模式目前相对成熟，但该商业模式的缺点也十分明显，即占地面积较大，电站的投资成本过高，而且大型光伏电站一般会离用电端较远，长距离的输电损耗也让光伏发电的效率大大降低。占光伏发电总量较小的分布式发电模式可以很好地解决这一问题。由于分布式光伏有着以往传统能源无法企及的聚变效应，在分布式光伏中，终端用户可以直接参与并直接获益，有利于形成全社会零碳认识和保证用能的高度自主性。

因此，在“碳中和”的愿景下，光伏产业亟需大力布局分布式光伏，并且发展分布式光伏商业模式。目前的分布式光伏市场的商业模式还较少，表3列出了目前主要的分布式光伏商业模式，对比了不同模式的光伏电站的所有人、前期资金的投入以及该模式下收益方式。可以看出，主要商业模式包括个人自投模式、合同能源管理模式、

网络众筹募集模式和个人屋顶光伏电站租赁模式，四种商业模式有三种方式的收益来源依赖于政府补贴，然而随着国家对光伏产业的补贴减少，分布式光伏的商业模式是否能实现盈利存疑，也是急需解决的问题。随着光伏产业的发展，衍生出“互联网+光伏”商业模式。该种商业模式充分发挥互联网的优势，快速高效地建设分布式光伏项目，尽量减少项目推进过程的中间环节成本，欲从光伏产业的上中下游全面覆盖。在上游环节，搭建光伏材料产品 B2B 平台，让光伏原料产品得以便捷地销售；在中游环节，建设光伏系统服务平台以及光伏电站交易平台，提高光伏产品用户的使用体验；最后，在下游环节，建立光伏金融平台，光伏电站投资属于资本密集型业务，需要多种特有融资方式，这一需求会大大刺激光伏金融平台的搭建。

表 3 分布式光伏的商业模式

Table 3 Distributed photovoltaic business model

Mode name	Owner of photovoltaic power station	Source of investment funds	Source of income
Personal investment mode	Unit or individual	Domestic investment	Save the electricity charge, the extra electricity to surf the Internet, get the government subsidy
Contract energy management model	Energy companies	Bank loan, lease financing	Charge users' electricity, access the Internet with excess electricity, and obtain government subsidies
Network crowd-funding mode	Energy companies	Raise many investors	Charge users' electricity, access the Internet with excess electricity, and obtain government subsidies
Personal rooftop PV power station rental model	Energy companies	financing	The end user signs a contract with the energy company, pays a rental fee and shares the revenue

2.2 扶持政策

世界上主要的发达国家如德国、日本等，其光伏产业都是依靠国家层面的扶持政策才得以快速推动。德国于 2004 年实施《可再生能源法》，该法案规定电力公司必须优先购买屋顶光伏所发电力，是以高于普通电价的一倍的价格购买，但是普通居民还是以普通电价去购买光伏发电系统发出的电^[38]。再比如日本，根据日本光伏政策的扶持政策，家庭安装光伏发电系统可获得 7 万日元/kW 的补贴，同时运行商用光伏发电系统的企业同样可以获得光伏发电成本 1/3 的补贴^[39]。

表 4 汇总了 2018 年到 2021 年 6 月，国家在光伏行业实行的相关政策。该表从政策类型、政策数量、代表性政策及其内容四个方面进行汇总。从表中政策的数量和内容可看出，国家在积极地对光伏产业发展的各个阶段进行政策引导。在宏观层面，积极发文推广规划光伏产业发展；在消

纳环节，对各省可再生能源的消纳考核指标进行明确，表明了国家对发展光伏发电的重视程度；到终端用户环节，积极给予国家补贴，使得光伏电站投资能够和火电、水电竞争。

在双碳目标下，各地也出台了整县光伏试点推进政策，率先在机关事业单位、城市公共建筑建设屋顶光伏项目。在 28 个发展及规划类型的政策中，多次提到发展光伏瓦、光伏幕墙等建材型光伏技术。无论是屋顶光伏建设还是建材型光伏技术的发展都离不开光伏电池材料的柔性化、薄膜化。因此，为推动光伏建筑的建设，需大力发展薄膜型光伏电池材料、新型光伏电池材料。

同时，光伏发电的应用只有大规模的使用才能降低使用成本，发达国家在发展光伏的初期也都是靠国家政策扶持才得以快速发展。因此，我国仍需在光伏产业发展的各个发展阶段出台合适的政策助力光伏产业的健康发展。

表 4 光伏产业相关政策
Table 4 Photovoltaic industry-related policies

Policy type	Number of policies	Representative policies	Content of representative policies
Development and planning policies	28	Guidelines on Energy Work in 2021	Wind power and photovoltaic power generation should account for about 11% of the total electricity consumption in China. Starting from 2021, weights for provincial consumption will be released at the beginning of each year, while weights for the current year and the following year will be issued. Weights for the current year are mandatory indicators for provincial assessment, and weights for the next year are prospective indicators for provincial project reserve.
Given policies	9	Notice on the Weight of Responsibility for Consumption of Renewable Energy Electricity in 2021 and Related Matters	Make it clear that all projects that have completed the approval (filing) procedures and completed full capacity grid connection in 2006 and later years can be declared into the subsidy list.
Subsidy policies	14	Notice on Accelerating the Review of the List of Subsidized Renewable Energy Power Generation Projects	

2.3 光伏产业商业模式以及扶持政策的建议

在“双碳”目标的推进过程中，能够控制供电行业的碳排放是重中之重，而光伏产业可有效减少供电行业生产电能所产生的碳排放量。分布式光伏是一种较为理想的电力供应方式，用户主体可直接参与电力供应过程，并且可直接获益，这是以往传统能源供应方式无法达到的。然而，分布式光伏要想达到预期目标，光伏产业仍需要在商业模式、运维管理和技术创新方面做出努力。同样，国家扶持政策也可以跟随产业发展做出一些改进。

在商业模式方面，目前分布式光伏主要面临前期建设投资门槛高、中期设备日常维护难、后

期收益过度依赖补贴这三个问题。本文认为可通过以下方式对面临的困难做出改进：(1) 针对前期建设投资门槛高的问题，分布式光伏可在资本运作方面进行创新，光伏产业是一个资本密集型产业，前期需要大量的资金投入，这是无法避免的，所以在未来发展光伏产业亟需资本运作形式的创新，光伏产业可以衍生各类光伏金融产品，同时有关政府部门可以推动光伏电站进行资产证券化运作，如对分布式光伏电站实行金融产品租售的形式，这样有效解决光伏电站建设投资门槛过高的问题。(2) 针对中期运维问题，分布式光伏可大力推广“互联网+光伏”商业思维，搭建光伏系统服务平台，使得光伏运维管理全面智能化、数

字化。(3)在后期环节,针对保障光伏用户的收益的问题,可以将光伏与金融产品结合起来,将光伏项目化作类似于不动产信托基金类产品,从而保证后期光伏用户的收益。

在政策扶持方面,在我国“十四五”期间的光伏产业主要面临两方面的问题,光伏技术问题和非光伏技术问题,非光伏技术问题指的是光伏市场打开的过程中,非技术性成本过高,比如土地租金成本过高、项目手续费高昂等。其次,能源互联网技术需要大力发展,推进可再生能源数字化进程也可大大保证光伏新能源电网的稳定输出。因此,要想大力推进我国光伏技术大规模应用,(1)首先,针对光伏技术问题,需要政策引导光伏技术的进步,传统的硅基光伏电池由于其成熟的制造工艺和较好的转化效率仍有发展的必要,需要开发如杂化、薄膜化等方式使得硅基光伏电池的制备成本降低。除此以外,新型光伏电池由于其高理论转化效率和低使用成本,是面向未来的光伏电池材料,所以需要政策扶持其解决目前面临的技术问题,包括光电转化效率、稳定性、环境友好度及电池大面积制备等技术的突破,需要分门别类针对性突破,从而推动新型光伏的电池的全面商业化,得到大规模应用。(2)其次,针对非光伏技术问题,在新阶段光伏产业的发展进程中,需要政策性支持以减少光伏项目的非技术性成本;除此以外,对新能源电网实行数字化管理也不可忽略,而这也需要能源互联网技术的进步,所以也需要政策性支持光伏周边产业及研究。

3 “双碳”目标下光伏发电的应用前景

为实现“双碳”目标,能源是主战场,光伏是清洁能源的代表之一,光伏不仅可以应用到供电行业,同样可以应用到建筑、交通、生活基础设施以及农业等领域中。

(1) 光伏在建筑领域的应用

BIPV是目前建筑节能的重要手段。我国有丰富的屋顶资源,如何将这些屋顶资源利用起来便成为了实现“双碳”目标的关键点之一。建筑光伏的应用形式具有多样性,可以应用在非常多的用能场景中。光伏组件可以安装在建筑屋顶上,如大型企业的工厂、商业大楼、家庭、停车棚、加油站、医院、学校、仓储中心等建筑的屋顶上。这些应用场景都有着十分适合大面积安装光伏组件的屋顶资源,同时建筑耗能也较多,如果能够

因地制宜地应用分布式光伏技术,不但可以解决用户的用电问题,还可以减少因发电产生的碳排放。

然而,目前在建筑领域大面积实现建筑光伏一体化还有些挑战,由于建筑与光伏是完全不同的两个领域。建筑上使用光伏产品需要光伏企业在产品上做出相应改变,同时建筑领域的专业人员也需要将在建筑上建设分布式光伏电站的思想从系统上进行设计。建筑和光伏进行融合仍需要建筑行业、光伏行业的专家学者的共同努力。除此以外,BIPV技术在应用的过程中也会遇到光伏组件由于高温效率衰减以及在建筑不同位置的光伏组件的输出匹配问题^[40]。针对以上技术问题,技术人员主要应用主动式或被动式散热技术以解决光伏组件的散热问题,而光伏组件的输出匹配问题需要在BIPV项目设计初计算好不同组件位置的遮阴距离,从而最大程度地解决光伏组件的输出匹配问题。

在光电建筑的发展过程中,除了技术问题会阻碍BIPV的发展,非技术问题也在困扰着光电建筑的发展。首先,建筑业主对BIPV认识不够,针对这一问题需要根据不同业主的需求让其知晓应用BIPV后带来的益处,针对性地解决建筑业主对光电建筑发展的抵触。其次,建筑光伏属于资金密集型项目,很多建筑业主很难融到如此大量的资金。因此,光伏市场的金融属性已经十分明显,需要我国金融市场的进一步放开。最后,建筑光伏的收益问题,目前我国对此的激励政策还不足,导致发电商对收益情况存疑,从而阻碍BIPV发展。

(2) 光伏在交通领域的应用

从全球碳排放量看,全世界交通领域的碳排放量达到25%左右^[41]。所以实现交通领域“碳中和”是实现全面“碳中和”的关键点之一。光伏发电在交通领域可以有十分广阔的应用场景,一是通过建设大型光伏电站并配合储能方式,以供给新能源车使用。比如城市交通中大面积的停车场、地面及高架车站等场景利用这些交通配置广阔空间建设光电建筑项目。二是应用在交通基础服务设施上。比如应用在交通信号灯、路灯已经交通指示牌等场景。

(3) 光伏在农业领域的应用

“光伏+农业”是近年来较为热门的光伏应用场景^[42],由于建设光伏电站需要占用土地资源,而土地资源有时又成为了制约光伏产业发展的重

要原因, 于是有学者提出农光互补模式。通过结合最新的光伏与农业技术, 最大程度的利用土地资源, 增加生态和经济效益, 提高当地农民收入, 带动当地经济发展。比如分布式光伏电站可应用在农业灌溉中, 光伏系统给灌溉水泵供电, 同时多出的电可供农民使用。除此以外, 分布式光伏也可应用在农业温室系统中, 可利用薄膜光伏电池的透光性搭建农业温室大棚, 既可以利用大棚空间光伏发电, 也可利用其可控温控湿的功能生长作物。

农光互补的模式也给渔业养殖提供了思路, 渔光互补也是一种新型的发电模式, 在该模式下, 在鱼塘上安装分布式光伏电站, 光伏组件下面的水域可以养殖渔产品。在渔光互补的模式下, 渔民既可以获得渔产品收益还可以获得光伏发电收益, 是一种较为理想的分布式光伏应用模式。

4 结论

(1) 在光伏电池材料研究进展方面, 硅基光伏电池仍是目前的主流产品, 并且由于单晶硅电池本身的转化效率较高加上近年来电池技术的进步, 单晶硅电池的制备成本已经低于多晶硅电池, 在光伏市场逐步占据多晶硅电池的市场。薄膜光伏电池和新型光伏电池材料具有薄、柔性及半透明特点, 在光伏电站发电和 BIPV 等应用场景拥有巨大发展前景。

(2) 在光伏产业商业模式和扶持政策方面, 光伏产业的发展离达到“双碳”目标的要求还任重道远。主要遇到的问题分为技术问题和非技术问题。技术问题主要是光伏电池材料的转化效率、稳定性、环境友好度以及大面积制备技术仍需要广大科研人员进行研究, 使效率高、成本低的新型光伏电池早日实现产业化; 非技术问题主要体现在缺少科学的商业模式以及精准的扶持政策。目前, 仍需要政策引导来解决以上两类问题。

(3) 在光伏发电的应用前景方面, 光伏未来不仅可以应用在集中供电领域, 而且可通过分布式光伏电站的形式应用在建筑、交通、农业等领域, 将分布式光伏电站与房屋、车辆、土地等资源有机的结合在一起, 形成优势互补, 既能实现减少碳排放又能促进原领域的产业进步。

为助力实现我国“碳中和”目标, 光伏产业及其应用占有十分重要的地位, 通过政策引导解决技术问题和非技术问题, 使光伏发电成本降低,

同时庞大的市场又会刺激光伏技术的迅猛发展, 光伏产业将会形成良性循环的发展模式, 最终可以加速我国“碳中和”目标的实现进程。

参考文献:

[1] 张志国, 陈祺. 向具有商业化前景的光伏材料迈进: 一类低成本高效率的聚合物给体材料[J]. 功能高分子学报, 2020, 33(5): 415-420.
ZHANG Zhiguo, CHEN Qi. Towards commercial photovoltaic materials: A new class of polymeric donor materials with low cost and high efficiency[J]. Journal of Functional Polymers, 2020, 33(5): 415-420(in Chinese).

[2] 殷志刚. 太阳能光伏发电材料的发展现状[J]. 可再生能源, 2008(5): 17-20.
YIN Zhigang. Research status of solar PV generate power materials[J]. Renewable Energy Resources, 2008(5): 17-20(in Chinese).

[3] MENG L, ZHANG Y, WAN X, et al. Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency[J]. Science, 2018, 361(6407): 1094-1098.

[4] NEELAM R, LAL P N, FATIHA Y, et al. A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications[J]. International Journal of Ambient Energy, 2021, 42(10): 1200-1217.

[5] 严大洲, 刘艳敏, 万炜, 等. 晶硅太阳能在“双碳”经济中的作用与影响[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(5): 1-6.
YAN Dazhou, LIU Yanmin, WAN Ye, et al. Effect and impact of crystalline silicon solar energy in the "double carbon" economy[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(5): 1-6(in Chinese).

[6] 中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2020年中国光伏技术发展报告—晶体硅太阳能电池研究进展(1)[J]. 太阳能, 2020(10): 5-12.
China Photovoltaic Society. Report on 2020 China PV technology development—Research progress of crystalline silicon solar cells (1)[J]. Solar Energy, 2020(10): 5-12(in Chinese).

[7] 孙良芳, 李儒, 邸江涛, 等. (PEDOT-PSS)-碳纳米管复合膜硅基太阳能电池[J]. 复合材料学报, 2017, 34(11): 2385-2391.
SUN Liangfang, LI Ru, DI Jiangtao, et al. (PEDOT-PSS)-carbon nanotubes composite films for Si solar cells[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(11): 2385-2391(in Chinese).

[8] YANG R, LEE C, CUI B, et al. Flexible semi-transparent a-Si:H pin solar cells for functional energy-harvesting applications[J]. Materials Science & Engineering B, 2018, 229:

- 1-5.
- [9] 齐鹏飞, 谢春梅, 王焜, 等. CdTe薄膜电池组件在光伏建筑一体化应用分析[J]. *玻璃*, 2021, 48(7): 52-55.
 QI Pengfei, XIE Chunmei, WANG Kun, et al. Application analysis of CdTe solar module in integrated photovoltaic building[J]. *Glass*, 2021, 48(7): 52-55(in Chinese).
- [10] 张战战, 叶华胜, 吴佳铭, 等. 碲化镉薄膜电池在建筑中的应用[J]. *能源研究与管理*, 2020(3): 70-74.
 ZHANG Zhanzhan, YE Huasheng, WU Jiaming, et al. Application of CdTe thin film battery in building[J]. *Energy Research and Management*, 2020(3): 70-74(in Chinese).
- [11] 张双双, 赵超亮, 郑直. 薄膜光伏与建筑集成化研究进展[J]. *化工新型材料*, 2021, 49(10): 71-75.
 ZHANG Shuangshuang, ZHAO Chaoliang, ZHENG Zhi. Progress on building integrated thin-film photovoltaic[J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(10): 71-75(in Chinese).
- [12] 中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2019年中国光伏技术发展报告(1)[J]. *太阳能*, 2020(1): 25-32.
 China Photovoltaic Society. Report on 2019 China PV technology development (1)[J]. *Solar Energy*, 2020(1): 25-32(in Chinese).
- [13] 郝安林. 染料敏化太阳能电池研究现状[J]. *安阳工学院学报*, 2018, 17(6): 7-10.
 HAO Anlin. Research of the dye-sensitized solar cells[J]. *Journal of Anyang Institute of Technology*, 2018, 17(6): 7-10(in Chinese).
- [14] 中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2019年中国光伏技术发展报告—新型太阳电池的研究进展(4)[J]. *太阳能*, 2020(8): 5-9.
 China Photovoltaic Society. Report on 2020 China PV technology development—Research progress of new solar cells (4)[J]. *Solar Energy*, 2020(8): 5-9(in Chinese).
- [15] 张晴, 黄其煜. 碳材料在染料敏化太阳能电池和钙钛矿太阳能电池对电极中的应用进展[J]. *材料工程*, 2018, 46(5): 56-63.
 ZHANG Qing, HUANG Qiyu. Novel progress on application of carbon materials as counter electrode in dye-sensitized solar cells and perovskite solar cells[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(5): 56-63(in Chinese).
- [16] 刘俊, 魏爱香, 刘传标, 等. ZnO-TiO₂染料敏化太阳能电池的制备和性能[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(6): 159-165.
 LIU Jun, WEI Aixiang, LIU Chuanbiao, et al. Preparation and property of dye-sensitized solar cells based on ZnO-TiO₂ composite photoanodes[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(6): 159-165(in Chinese).
- [17] MENKE T, WEI P, RAY D, et al. A comparison of two air-stable molecular *n*-dopants for C₆₀ [J]. *Organic Electronics*, 2012, 13(12): 3319-3325.
- [18] 中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2019年中国光伏技术发展报告—新型太阳电池的研究进展(1)[J]. *太阳能*, 2020(5): 5-15.
 China Photovoltaic Society. Report on 2019 China PV technology development—Research progress of new solar cells (1)[J]. *Solar Energy*, 2020(5): 5-15(in Chinese).
- [19] 赵聆然, 熊艳. 钙钛矿太阳电池光吸收层的研究进展[J]. *现代化工*, 2021, 41(5): 68-72.
 ZHAO Lingran, XIONG Yan. Recent development on light absorbing layer of perovskite solar cells[J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(5): 68-72(in Chinese).
- [20] AKIHIRO K, KENJIRO T, YASUO S, et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131(17): 6050-6051.
- [21] JAEKI J, MINJIN K, JONGDEUK S, et al. Pseudo-halide anion engineering for α -FAPbI perovskite solar cells[J]. *Nature*, 2021, 592(7854): 381-385.
- [22] 段家顺, 彭丽萍, 于华阳, 等. 二维卤化物钙钛矿太阳能电池稳定性和效率的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(5): 1890-1906.
 DUAN Jiashun, PENG Liping, YU Huayang, et al. Research progress on the stability and efficiency of the two-dimensional halide perovskite solar cells[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(5): 1890-1906(in Chinese).
- [23] 刘海潮, 谢亚红, 魏鹏, 等. 不同生物质来源的多孔碳复合碳电极在钙钛矿太阳能电池中的应用[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(5): 1956-1966.
 LIU Haichao, XIE Yahong, WEI Peng, et al. Application of porous carbon composite carbon electrodes from different biomass sources in perovskite solar cells[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(5): 1956-1966(in Chinese).
- [24] 中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2020年中国光伏技术发展报告—晶体硅太阳电池研究进展(2)[J]. *太阳能*, 2020(11): 24-31.
 China Photovoltaic Society. Report on 2020 China PV technology development—Research progress of crystalline silicon solar cells (2)[J]. *Solar Energy*, 2020(11): 24-31(in Chinese).
- [25] 柴甜甜. 硅基薄膜太阳能电池发展现状[J]. *科技创新与应用*, 2020(34): 53-54, 56.
 CHAI Tiantian. Development status of silicon based thin film solar cells[J]. *Technology Innovation and Application*, 2020(34): 53-54, 56(in Chinese).
- [26] 中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2019年中国光伏技术发展报告(3)[J]. *太阳能*, 2020(3): 5-13.

- China Photovoltaic Society. Report on 2019 China PV technology development (3)[J]. *Solar Energy*, 2020(3): 5-13(in Chinese).
- [27] 中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2019年中国光伏技术发展报告(4)[J]. *太阳能*, 2020(4): 5-11.
- China Photovoltaic Society. Report on 2019 China PV technology development (4) [J]. *Solar Energy*, 2020(4): 5-11(in Chinese).
- [28] 中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2019年中国光伏技术发展报告—新型太阳电池的研究进展(2)[J]. *太阳能*, 2020 (6): 5-16.
- China Photovoltaic Society. Report on 2019 China PV technology development—Research progress of new solar cells (2)[J]. *Solar Energy*, 2020(6): 5-16(in Chinese).
- [29] 杨志胜, 柯蔚芳, 王艳香, 等. 无铅Cu基杂化钙钛矿太阳电池[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(4): 455-460.
- YANG Zhisheng, KE Weifang, WANG Yanxiang, et al. Lead-free Cu based hybrid perovskite solar cell[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(4): 455-460(in Chinese).
- [30] LI Minghua, ZUO Chuantian, HU Jinsong, et al. Carrier management makes perovskite solar cells approaching Shockley-Queisser limit[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(14): 1372-1374.
- [31] 赵清, 骆超, 赵耀, 等. 钙钛矿太阳能电池中的量子点钝化和I型能带结构的构建[C]//第八届新型太阳能材料科学与技术学术研讨会论文集. 北京, 2021: 16.
- ZHAO Qing, LUO Chao, ZHAO Yao, et al. Quantum dot passivation and type I band structure construction in perovskite solar cells[C]//Proceedings of the 8th Symposium on New Solar Materials Science and Technology. Beijing, 2021: 16(in Chinese).
- [32] WANG Kaili, LI Xiaomei, LOU Yanhui, et al. CsPbBrI₂ perovskites with low energy loss for high-performance indoor- and outdoor photovoltaics[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(4): 347-353.
- [33] 张地伟, 吴永真, 朱为宏. 金属离子掺杂提升全无机CsPbX₃钙钛矿太阳电池稳定性研究进展[J]. *应用技术学报*, 2020, 20(2): 111-117.
- ZHANG Diwei, WU Yongzhen, ZHU Weihong. Stability enhancement for all inorganic CsPbX₃ perovskite solar cells via metal ions doping[J]. *Journal of Technology*, 2020, 20(2): 111-117(in Chinese).
- [34] YUMA K, TOMOHIRO H, SHIMPEI N, et al. Renaissance of fused porphyrins: Substituted methylene-bridged thiophene-fused strategy for high-performance dye-sensitized solar cells[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141(25): 9910-9919.
- [35] 李永舫. 共轭聚合物受体光伏材料和全聚合物太阳电池[J]. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(1): 200-208.
- LI Yongfang. Conjugated polymer acceptor materials and all polymer solar cells[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2021, 37(1): 200-208(in Chinese).
- [36] ZHANG T, AN C, BI P, et al. A thiadiazole-based conjugated polymer with ultradeep HOMO Level and strong electroluminescence enables 18.6% efficiency in organic solar cell [J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(35): 2101705.
- [37] 李波, 赵建红, 赵鑫波, 等. 新型太阳能电池的研究进展及发展趋势[J]. *能源研究与信息*, 2021, 37(1): 32-39.
- LI Bo, ZHAO Jianhong, ZHAO Xingbo, et al. Research progress and development trend of new type of solar cells[J]. *Energy Research and Information*, 2021, 37(1): 32-39(in Chinese).
- [38] 王永杰, 王若男. 德国《可再生能源法》(EEG-2021)的最新进展及对我国的启示[J]. *中外能源*, 2021, 26(6): 17-24.
- WANG Yongjie, WANG Ruonan. Latest development of Germany's renewable energy law (EEG-2021) and its enlightenment to China[J]. *Sino-global Energy*, 2021, 26(6): 17-24(in Chinese).
- [39] 裴海天. 绿色发展理念下光伏产业法律制度优化研究[J]. *河南理工大学学报(社会科学版)*, 2021, 22(4): 24-30.
- PEI Haitian. Research on the optimization of the legal system in photovoltaic industry under the concept of green development[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Social Sciences)*, 2021, 22(4): 24-30(in Chinese).
- [40] 吴高翔, 王凯. 光伏建筑一体化存在的问题及解决方法分析[J]. *智能城市*, 2021, 7(7): 39-40.
- WU Gaoxiang, WANG Kai. Analysis of existing problems and solutions of photovoltaic building integration[J]. *Intelligent City*, 2021, 7(7): 39-40(in Chinese).
- [41] 邵丹, 李涵. 城市客运交通电动化碳减排效益和碳达峰目标—以上海市为例[J]. *城市交通*, 2021, 19(5): 53-58, 42.
- SHAO Dan, LI Han. Decarbonization benefits and carbon peak goals of urban passenger transport electrification: Case study of shanghai[J]. *Urban Transport of China*, 2021, 19(5): 53-58, 42(in Chinese).
- [42] 王玲俊, 陈健. 光伏与农业结合的相关研究综述[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(18): 18-21, 29.
- WANG Lingjun, CHEN Jian. Review of related research on the integration of photovoltaic and agriculture[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(18): 18-21, 29(in Chinese).

作者简介



蔡琦琳, 2018年6月毕业于中国科学技术大学, 获动力工程及工程热物理专业博士学位。2018年9月入职苏州大学, 主要以能源高效利用为背景, 在近场热光伏系统机理、耐高温选择性热辐射器研制、工业设备能效监测与评估等方面开展前沿的基础和应用研究。近年来, 以第一/通讯作者发表论文14篇 (SCI论文10篇, EI论文4篇), 主持科研项目3项, 其中省部级、市厅级和横向项目各1项, 授权发明专利1项, 实用新型专利2项, 获得市级科研奖项2项



吴玺, 2012年中国科学技术大学获工学博士学位, 现苏州大学能源学院教授, 能源与动力工程专业系主任, 苏州大学碳达峰·碳中和技术创新中心主任。2015年7月~2017年6月挂职于昆山张浦镇任

党委副书记。主要研究方向太阳能热化学制氢、热光伏技术及能源互联网, 共发表能源领域SCI、EI论文30余篇, 作为主要撰写人之一撰写并实施国家节能标准1项《工业窑炉燃烧节能评价方法(GB/T 32037—2015)》, 授权发明专利10项, 实用新型专利9项, 主持国家项目1项、省部级项目2项、产学研项目30项, 累计获得科研经费1000余万元。研发的水泵能效在线监测系统获江苏省质检科技进步三等奖。2018年在昆山德国工业园建立江苏省第一个园区级智慧能源示范园区, 并被江苏省质监局和江苏省经信委联合推荐为省级能源计量示范项目。2020年获江苏省能源协会科技创新一等奖。此外, 还担任苏州计量测试协会副理事长、苏州市工信局节能专家库成员、江苏省双创博士、江苏省节能专家库成员、江苏省国家电网综合能源服务专家库成员、全国燃烧节能净化标准化技术委员会委员等社会职务、中国能源学会专委委员