

蓬勃发展的钙钛矿太阳能电池*

黄天宇¹ 吴疆^{2,†} 赵丽宸^{1,††} 朱瑞^{1,2,3,4,†††}

(1 北京大学 人工微结构和介观物理全国重点实验室 北京 100871)

(2 北京大学 长三角光电科学研究院 南通 226010)

(3 北京大学 教育部纳光电子前沿科学中心 北京 100871)

(4 山西大学 极端光学协同创新中心 太原 030006)

2025-04-16收到

† email: wujiang@pku.edu.cn

†† email: lczhao@pku.edu.cn

††† email: iamzhurui@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250801

CSTR: 32040.14.wl20250801

Perovskite solar cells are thriving

HUANG Tian-Yu¹ WU Jiang^{2,†} ZHAO Li-Chen^{1,††} ZHU Rui^{1,2,3,4,†††}

(1 State Key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 Yangtze Delta Institute of Optoelectronics, Peking University, Nantong 226010, China)

(3 Frontiers Science Center for Nano-optoelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

(4 Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

摘 要 新能源技术的发展浪潮浩浩荡荡，每一种新兴技术都身处潮流之中。钙钛矿太阳能电池技术是一位实力与运气兼备的“未来之星”，过去十余年间，已认证光电转换效率一路飙升至27.0%，走完了它的前辈——晶硅太阳能电池用了大半个世纪才走完的路。钙钛矿太阳能电池技术之所以发展得如此迅猛，主要归功于其具有组分和带隙灵活可调、原料来源广泛、工艺简单、成本低廉等方面的优势。除此之外，它还具备轻质柔性、可与硅基太阳能电池集成的优势，使其应用空间得到了进一步拓展，显示出成为新一代主流光伏技术的巨大潜力。文章回顾钙钛矿太阳能电池的基本物理原理与发展历程，详细阐述电池器件结构的划分和组成，总结针对电池结构及相关材料的优化手段，并分类介绍不同类型的钙钛矿太阳能电池及发展现状，最后对钙钛矿太阳能电池的研究进行展望。

关键词 钙钛矿太阳能电池，新能源技术，光伏效应，光电器件

Abstract The development of renewable energy technologies is unstoppable. Perovskite solar cells (PSCs) are one such “rising star” with both strength and luck. Over the past decade, their certified power conversion efficiency has soared to 27.0%, which is a milestone that took crystalline silicon solar cells more than half a century to achieve. This rapid progress can be largely attributed to the unique advantages of perovskite materials, including their tunable composition and bandgap, abundant raw material sources, simple fabrication process, and low production cost. In addition, PSCs have the advantages of being lightweight and flexible and being able to be integrated with silicon-based solar cells, further broadening their application potential and positioning them as a strong contender for next-generation mainstream photovoltaic technologies. This article reviews the fundamental physical principles and development of PSCs. We describe the classification and composition of different devices in detail, summarize the strategies for optimization of their structures and materials, and discuss the

current status of various types of PSCs. Finally, we present some personal perspectives on the future research and development of this field.

Keywords perovskite solar cells, renewable energy technology, photovoltaic effect, photoelectric devices

1 引言

今天的故事始于一个家喻户晓的天才——阿尔伯特·爱因斯坦：1905年，他在革命性论文《关于光的产生和转化的一个试探性观点》中提出光子概念，成功解释了光电效应，并因此获得1921年诺贝尔物理学奖^[1]。他将光描述成跳跃的粒子——光子，它们如太阳的使者，携带能量；其中“勇猛”的蓝光或紫外光的高能量光子，能使金属中的电子挣脱束缚，自由跃出。这正是太阳能电池的奥秘：光子赋能吸光材料中的电子，使其跳跃到更高的能级。而电池内部的p-n结则像是一个精心设计的舞池，内建电场指挥着这些电子在释放完能量之前，跳上一曲霹雳舞，将光能转化为电能，为人类的生活带来能源。

我们可以用“热情似火”来形容宇宙中的太阳，它时刻在以各种形式向外散播能量。用物理

学的语言讲，太阳的“热情”可以用5800 K的黑体辐射光谱进行近似模拟。但当这份“热情”到达地面时，已被地球大气中的臭氧、氧气、水蒸气等大幅削弱。为标准化定义经过大气过滤的光谱，人们引入了大气质量(air mass, AM)，即太阳光经由大气层所经过的距离与其可能的最短距离之比：

$$AM = \frac{1}{\cos \theta},$$

其中 θ 为天顶角，如图1所示。当前世界通用的太阳能电池标准测试条件采用太阳光经过1.5倍地球大气层后入射到地球表面的光谱(1.5 global spectrum, AM 1.5G)，即 $\theta=48.2^\circ$ 时的太阳光谱^[2, 3]，入射光能量密度为 $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，测试温度为 $T=25 \pm 1^\circ \text{C}$ 。当我们谈论太阳能电池的性能时，AM 1.5G太阳光谱可以为比较和竞争提供标准线，公平、公正、公开。在这个万众瞩目的大舞台上，不同太阳能电池之间的你追我赶不仅是一场技术的较量，更是对太阳能电池潜力的一次全面的探索 and 展示。

今天的主角是钙钛矿太阳能电池，自然要从“钙钛矿(perovskite)”说起。最初，“钙钛矿”是指钛酸钙(CaTiO_3)这种矿物，它在1839年被德国矿物学家Gustav Rose于俄罗斯乌拉尔山中发现，并以俄罗斯地质学家Lev Perovski的名字来命名，这位老先生估计也没想到百年后的今天一大群来自世界各地的科研人员会天天把他的名字挂在嘴边，甚至这些人的研究内容和地质学几乎毫无关系。如今，“钙钛矿”则是指具有与 CaTiO_3 相同晶体结构(钙钛矿结构)的一类化合物，这类化合物具有共同的化学式 ABX_3 ，其中A和B为尺寸不同的阳离子，X为阴离子。

理想的钙钛矿为等轴晶系结构，如图2所示，

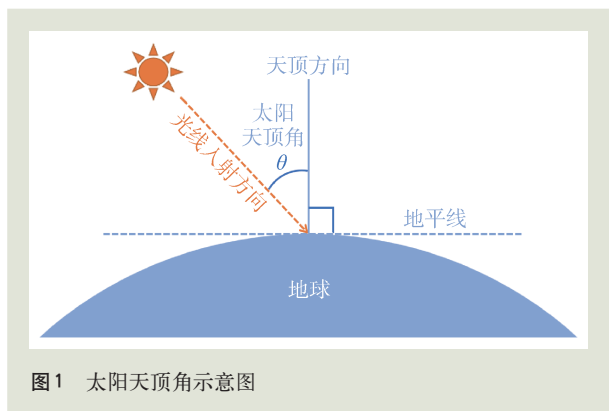


图1 太阳天顶角示意图

* 国家重点研发计划(批准号：2021YFB3800101)、国家自然科学基金(批准号：U24A6003、52325310、52203208、52303217)、北京市科技新星计划(批准号：20230484480)、江苏省自然科学基金(批准号：BK20220302)、云南省西南联合研究生院科技专项(批准号：202302AO370013)、松山湖材料实验室开放研究基金(批准号：2022SLABFK07)、中国科协青年人才托举工程(批准号：YESS20240571)、水果基金(批准号：20210001)资助项目

可被视为 $[BX_6]$ 八面体在三维空间中共用 X 位离子连接组成的网格状框架；而 A 位离子则嵌于八面体间的空隙中^[4]。在温度、压力等外界条件变化或发生离子掺杂时， ABX_3 型钙钛矿结构会发生一系列畸变而产生相变。这时，需要引入早在1926年由 Victor Moritz Goldschmidt 提出的容忍因子 (tolerance factor, t)，它是用来描述具有 ABX_3 组成的物质能否形成钙钛矿结构的重要判据，其表达式如下所示：

$$t = \frac{R_A + R_X}{\sqrt{2} (R_B + R_X)},$$

其中 R_A 、 R_B 和 R_X 分别为 A 、 B 和 X 的离子半径。当 $t = 1$ 时，表明 $A-X$ 的键长等于 $B-X$ 键长的 $\sqrt{2}$ 倍，对应周期性排列的八面体结构；若 t 偏离1较多，则通常会形成低对称性结构。研究表明，稳定钙钛矿的 t 值通常接近1，或介于0.8至1.0之间^[5, 6]。此外，共价键强弱、孤对效应、压强、温度等其他因素也对结构形成起着关键作用。

实际用于钙钛矿太阳能电池的是金属卤化物钙钛矿，其合成最早可追溯至1978年^[7]。它的 B 位被铅(Pb^{2+})或锡(Sn^{2+})等二价金属阳离子占据， X 位被碘(I^-)、溴(Br^-)、氯(Cl^-)或类卤素阴离子占据。此外， A 位被甲胺(Methylammonium, MA^+)或甲脒(Formamidinium, FA^+)等一价有机阳离子、铯(Cs^+)或铷(Rb^+)等一价无机阳离子占据。由此可见，这种材料其实既不含钙、也不含钛，有些“名不副实”的感觉，不过我们觉得 Gustav Rose 和 Lev Perovski 两位老先生应该也不会介意。金属卤化物钙钛矿是一种半导体材料，其带隙主要受到 B 位金属离子的 p 轨道与 X 位卤素离子的 p 轨道之间相互作用的影响^[8]：它的价带顶主要由 X 位离子的 p 轨道决定，而导带底则主要受 B 位离子的 p 轨道影响^[9]。通常，其带隙可通过组分调控，在1.3—3.5 eV 范围内灵活调节，这也是它的一个重要优点^[10]。

钙钛矿太阳能电池的诞生比金属卤化物钙钛矿材料的问世晚了三十余年，直到2009年前后才真正被发明出来。这一年，虽然整个世界尚处于2008年金融危机的“余震”之中，但经历“灾后

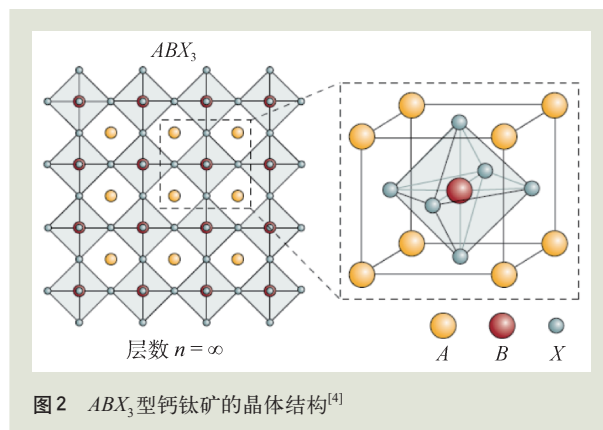


图2 ABX_3 型钙钛矿的晶体结构^[4]

重建”的世界逐渐展示出一片欣欣向荣的景象，光伏行业也不例外，硅基太阳能电池产业正在世界各地茁壮地发展着。也是这一年，日本的 Tsutomu Miyasaka 等人在《美国化学会志》上发表的论文首次将有机—无机杂化铅卤钙钛矿材料 $MAPbX_3$ ($X = I$ 或 Br) 作为光吸收材料，结合二氧化钛(TiO_2)纳米晶薄膜和碘电解质制备出了世界上第一块钙钛矿太阳能电池，其结构源于染料敏化太阳能电池。材料虽然新奇，但电池性能不尽人意，基于 $MAPbI_3$ 和 $MAPbBr_3$ 的电池光电转换效率分别仅有 3.81% 和 3.13%。并且稳定性也极差^[11]，传言在扫描一条电压—电流伏安特性曲线之后电池器件就失效了，因此该成果初期并未引起太大关注。两年之后，韩国的 Nam-Gyu Park 等人慧眼识珠，在 Miyasaka 等人的工作基础之上，通过优化 TiO_2 纳米晶的物化性质进一步将电池器件的光电转换效率提升到了 6.54%。但稳定性依然很差，仅仅持续光照 10 分钟左右，电池光电转换效率就已经衰减了大约 80%^[12]，这对于太阳能电池来说无疑是致命的。

时间来到2012年，钙钛矿太阳能电池迎来了真正的转折。两个研究团队分别独立在钙钛矿太阳能电池领域取得了突破性进展。Henry J. Snaith 等人使用绝缘的介孔氧化铝(Al_2O_3)替代了介孔 TiO_2 半导体，证明了钙钛矿材料不仅可以作为光吸收材料，还可以作为电荷传输材料，采用固态 2, 2', 7, 7'-四[N,N-二(4-甲氧基苯基)氨基]-9,9'-螺二芴(Spiro-OMeTAD)作为空穴传输层，制备出了全固态钙钛矿太阳能电池，其光电转换效率高达

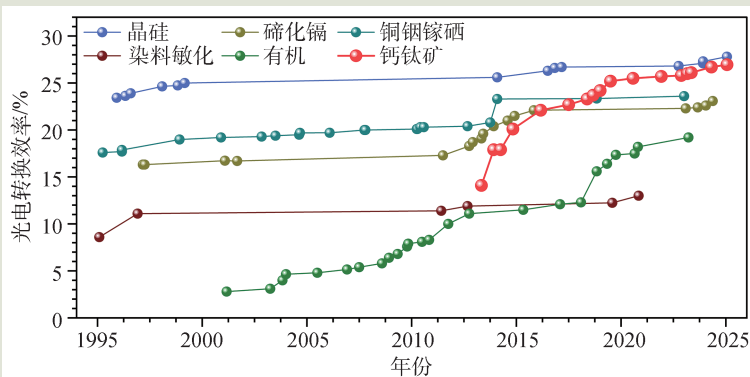


图3 不同种类太阳能电池效率进展图(图中数据摘自美国国家可再生能源实验室发布的《太阳能电池效率进展图》)^[15]

10.9%，并且开路电压高达 1.13 V^[13]。几乎同时，Nam-Gyu Park 与“染料敏化太阳能电池之父”Michael Grätzel 强强联合，在介孔 TiO₂ 层上沉积 MAPbI₃ 作为光吸收层，同样采用固态 Spiro-OMeTAD 作为空穴传输层，所获得的全固态钙钛矿太阳能电池的光电转换效率能够达到 9.7%^[14]。上述突破性的研究展现出了金属卤化物钙钛矿的巨大潜力，迅速引起了世界范围内科研人员的广泛关注和跟进。2013 年中期，其效率已突破 15%，并被 *Science* 杂志评为当年“十大科学突破”之一。从图 3 可见，钙钛矿太阳能电池技术发展一路高歌猛进，似有破竹之势^[15]。直至 2025 年的今天，单结钙钛矿太阳能电池的最高已认证光电转换效率已达 27.0%，足以媲美其前辈——单晶硅太阳能电池。它用短短十余年的时间便走完了晶硅电池用了大半个世纪才走完的路，且有着赶超前辈之势，着实是潜力无限。它的发展历程完美地诠释了何为“众人拾柴火焰高”、“打铁还需自身硬”。

2 电池结构及界面工程

钙钛矿太阳能电池最初借鉴染料敏化太阳能电池的介孔 TiO₂ 结构，有助于钙钛矿中光生载流子的传输。但这种介孔结构需高温烧结，增加了处理时间与成本。不过，转机发生在 2013 年于 *Science* 上同期发表的两篇重磅论文中。Tze Chien

Sum 等^[16]通过飞秒瞬态光谱表征手段证明了钙钛矿材料具有双极性传输行为——既可以传输电子也可以传输空穴。Henry J. Snaith 等^[17]发现甲胺基钙钛矿具有超过 1 μm 的载流子扩散长度。这些研究结果表明，钙钛矿材料体相具有优异的电荷传输特性，同时也为平面结构电池的可行性提供了坚实的理论依据。如图 4 所示，单结钙钛矿太阳能电池经过十几年的发展已衍生出多种结构，可根据是否包含介孔层分为介孔结构和平面结构，也可根据底部透明电极所接触功能层的不同分为正式结构(又称 n-i-p)和反式结构(又称 p-i-n)。正式结构率先取得突破，并长期占据效率纪录；而近年来反式结构迅猛发展，性能持续追赶，目前两者效率已基本持平，呈并驾齐驱之势^[18-20]。下面简单介绍一下每种结构及其研究进展。

(1) 介孔结构：介孔结构钙钛矿太阳能电池以正式介孔结构为主，其器件结构自下而上为：透明导电基底电极、致密金属氧化物层连同介孔金属氧化物层(作为电子传输层，常为 TiO₂)、钙钛矿吸光层、空穴传输层、金属背电极(图 4(a))。在这种结构中，致密 TiO₂ 作为空穴阻挡层，可使氟掺杂氧化锡(FTO)与 TiO₂ 之间形成肖特基势垒，阻止空穴由钙钛矿吸光层向 FTO 层的传输。除 TiO₂ 之外，Henry J. Snaith 等^[13]曾用介孔 Al₂O₃ 代替 TiO₂，Al₂O₃ 不参与电荷传输，仅起到支架作用，电荷可直接通过钙钛矿向两边进行传输。Hongwei Han 等^[21]于 2013 年开发出一种基于廉价碳电极的可印刷无空穴传输材料介观钙钛矿太阳能电池，具有多层介孔金属氧化物结构(TiO₂ 和 ZrO₂)特征，经过十年的努力，目前可达到 22% 的光电转换效率^[22]。此外，Liyuan Han 等^[23]研究了反式介孔结构，将致密氧化镍(NiO_x)与介孔 Al₂O₃ 结构相结合作为空穴传输层，制备并验证了相应结构电池的可行性。经过十余年的发展，目前介孔结构钙钛矿太阳能电池的最高光电转换效率可

达26.52% (认证值为26.31%)^[24],这也是我们研究团队的最新研究进展。

(2) 正式平面结构: 随着对钙钛矿材料研究的深入,研究者发现体相钙钛矿材料能够高效双极性传输载流子^[16, 25],因此钙钛矿太阳能电池可以采用相对来说更为简化的平面异质结结构。如图4(b)所示,在正式平面结构中,电子传输层通常采用致密TiO₂层或二氧化锡(SnO₂)层,均可通过低温工艺(退火温度≤180℃)制备。此外,SnO₂与FTO和氧化铟锡(ITO)等透明导电氧化物(TCO)成分相近,可减小折射率不匹配带来的光损失。空穴传输层方面,与正式介孔结构类似,多采用Spiro-OMeTAD或者类似物、聚[双(4-苯基)(2,4,6-三甲基苯基)胺](PTAA)或聚3-己基噻吩(P3HT)等有机材料。此外,还开发了CuSCN等无机空穴传输材料体系^[26]。近年来,正式平面结构钙钛矿太阳能电池发展迅速,其光电转换效率一度超过正式介孔结构,在2020—2023年之间独领风骚^[27]。

(3) 反式平面结构: 对于反式结构钙钛矿太阳能电池而言,因为缺乏合适、有效的介孔层材料,其研究主要围绕着反式平面结构电池进行。与正式结构相比,其优势包括电流—电压(*I*—*V*)迟滞效应较弱、制备温度低、叠层兼容性强等^[28, 29]。如图4(c)所示,反式平面结构电池的各个功能层从下到上依次为透明导电基底电极、空穴传输层、钙钛矿吸光层、电子传输层、缓冲层以及金属背电极。反式结构电池中的电子传输层沉积在钙

钛矿层之后,需温和制备以避免损伤钙钛矿,因此常使用富勒烯(C₆₀)及其衍生物(PC₆₁BM或PC₇₁BM)等。其中,C₆₀可采用热蒸发法制备,PC₆₁BM或PC₇₁BM可采用溶液涂布法制备。

关于反式平面结构钙钛矿太阳能电池的研究工作可追溯到2013年,彼时Tzung-Fang Guo等^[30]采用的空穴传输层为聚(3,4-亚乙二氧基噻吩)和聚(苯乙烯磺酸)共混材料(PEDOT:PSS)。在此之后,研究人员陆续发展出了PTAA、聚(4-丁基三苯胺)(Poly-TPD)等聚合物材料体系以及以NiO_x、CuO_x为代表的金属氧化物材料体系。从2014年起,我们研究团队开始了反式平面结构钙钛矿太阳能电池的研究。基于醋酸铅前驱体,开发了一系列的反式结构电池^[31—33]。2018年,我们研究团队基于PTAA空穴传输层,采用溶液涂布二次生长方法,创造了反式结构钙钛矿太阳能电池光电转换效率的世界纪录^[34]。同年,一类自组装单分子层(self-assembly monolayer, SAM)材料开始被用作空穴传输层^[35]。得益于SAM材料简便的制备工艺与良好的器件兼容性,反式结构电池的效率大幅跃升,并反超正式结构,频频刷新单结钙钛矿太阳能电池光电转换效率的世界纪录^[36, 37]。

无论正式还是反式结构钙钛矿电池,钙钛矿层都可利用一步法或两步法制备而成。一步法是将所有前驱体溶于特定溶剂,形成前驱体溶液并涂布于基底,生成湿膜;随后通过滴加反溶剂或真空闪蒸去除大部分溶剂,最后退火实现相转变,得到多晶钙钛矿薄膜^[38]。钙钛矿的前驱体通常为

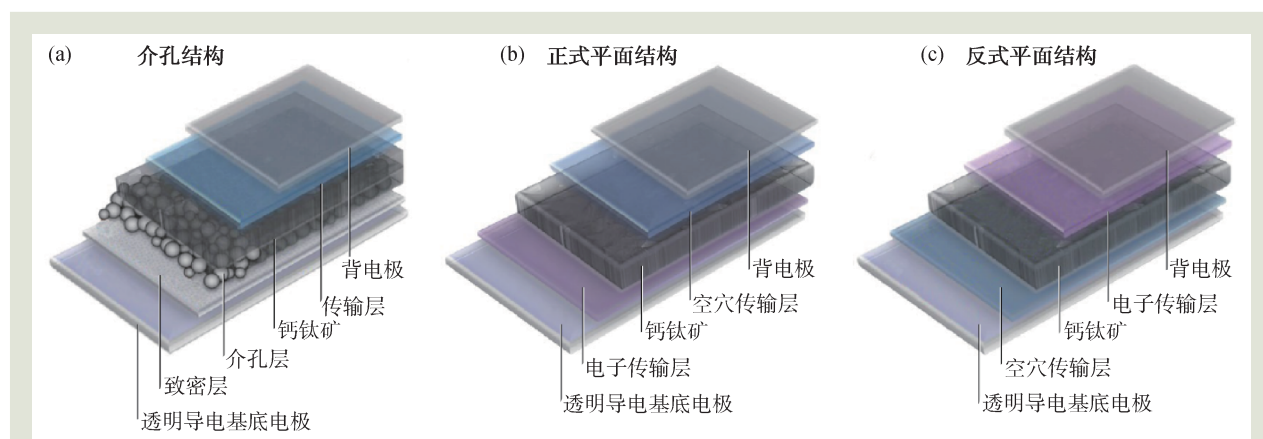


图4 钙钛矿太阳能电池器件结构示意图^[4]

卤化铅(PbX_2)、卤化甲铵(MAX)或卤化甲脒(FAX)等,溶剂通常为N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、二甲基亚砜(DMSO)、 γ -丁内酯(GBL)或N-甲基吡咯烷酮(NMP)等;反溶剂通常为氯苯(CB)、甲苯(Tol)或乙酸乙酯(EA)等。两步法则先将 PbX_2 溶液涂布并经低温退火,形成含部分溶剂的 PbX_2 薄膜;再将其浸入或涂布含MAX或FAX的有机铵盐溶液,使其渗透、反应,最终退火完成相转变,制得多晶钙钛矿薄膜^[39]。

由于钙钛矿电池是层层堆叠制备而成的薄膜电池,因此不同功能层间界面处的电荷传输过程对于电池性能有着决定性影响。如图5所示,钙钛矿薄膜表/界面处通常存在大量非辐射复合位点,显著影响电荷传输^[40]。同时,钙钛矿薄膜与电荷传输层之间的能级失配也会降低电池性能。因此如何优化钙钛矿薄膜的界面,调控各功能层间的能级匹配是领域研究的重中之重。

对于钙钛矿薄膜上界面,利用非钙钛矿前驱体的有机铵盐进行界面处理是最常用的方法之一。我们研究团队^[34]通过溴化胍后处理辅助钙钛矿薄膜二次生长,在钙钛矿薄膜近表面区域构筑带隙渐变结构,有效减少了界面缺陷并调控能级排布,显著降低了反式平面结构电池的电压损失。Jingbi You等^[41]发现用苯乙基碘化铵(PEAI)处理钙钛矿薄膜表面能够钝化其表面缺陷、抑制非辐射复合,获得了认证效率达23.32%(准稳态)的正式平面结构电池。

相对于钙钛矿薄膜上表面而言,钙钛矿薄膜的埋底界面(buried interface)由于其非暴露的特性,很多常用的表征技术均无法对其进行直接观测,但研究表明该界面质量对器件性能也至关重要^[42]。针对这一挑战,我们研究团队^[43]发展了多晶钙钛矿薄膜无损剥离技术和原位共聚焦底面荧光成像技术等一系列钙钛矿薄膜埋底界面研究方法,重新审视和理解了钙钛矿薄膜的埋底界面。埋底界面相较于上界面,具有更为严重的半导体异质性与更大面积的非辐射复合区域。值得一提的是,“埋底界面”这个中文专业术语名称是我们团队专门为“buried interface”起的中文名字,近几年也得到了同行们的广泛使用,相关研究呈现出井喷式的发展,许多课题组都利用埋底界面优化措施显著提升了钙钛矿太阳能电池的性能^[44]。在正式结构器件中,我们研究团队^[24]引入双(2-氨基乙基)醚(BAE)作为钙钛矿太阳能电池的埋底界面分子,实现了26.52%的光电转换效率(认证为26.31%),电池的光、湿和热稳定性亦显著增强。

3 双结和多结电池

研究者们对于提升太阳能电池光电转换效率的追求是永无止境的,就像是百米飞人大战,小数点后的每一个数字,都是领域内争夺的焦点。但根据Shockley—Queisser极限(亦称SQ极限或细致平衡极限)可知^[45],单结太阳能电池存在一个理论的光电转换效率上限,对于单结钙钛矿太阳能电池而言,这个理论极限值为33.7%^[46]。为了进一步提升电池的光电转换效率,更高效地利用太阳光子的能量,采用不同带隙的吸光材料吸收不同能量的光子是一个显而易见的策略。1994年,J. Meier等^[47]提出了叠层太阳能电池的概念,即顶层宽带隙半透明电池吸收高能光子,而透过的低能光子再由底层窄带隙电池吸收,有效降低了高

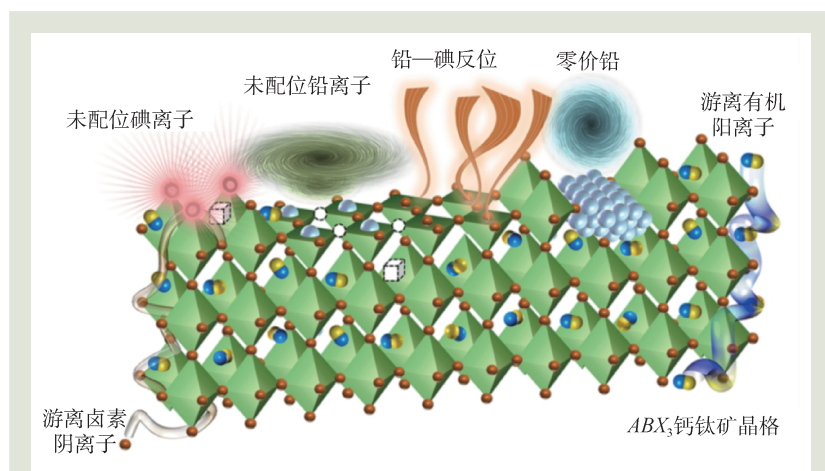


图5 钙钛矿材料的缺陷种类示意图^[40]

能光子的热化损失，从而更高效地利用太阳光谱。

一般来说，叠层太阳能电池主要分为两大类，如图6所示^[48]，分别为两端(2T)式和四端(4T)式^[49]。其中，两端式叠层太阳能电池是单片双电极器件，由两个或多个子电池串联构成。根据基尔霍夫定律，两端电池的短路电流由子电池中最低的決定，开路电压则为所有子电池电压之和，因此对电流匹配要求严格。四端叠层电

池则由两个或多个子电池机械堆垛并联构成，各子电池电路相互独立，可在各自最优工艺条件下分别制备，并能根据实际应用灵活排布，达到最佳工作状态。两端电池相对于四端电池来说，因需考虑子电池之间的界面接触，因此制备工艺更复杂、条件更苛刻，需要低电阻率、高透光率的电荷复合连接层，且各子电池工艺必须相互兼容，因此制备高质量器件难度大。但两端电池仅需一个透明电极，而四端电池则需三个及以上，无疑增加了寄生吸收和制造成本。

钙钛矿太阳能电池具有吸光系数高、载流子扩散长度长、带隙可调等优点，是一块优质的“砖”，哪里需要哪里搬，在叠层电池中作为顶/底电池皆可^[37, 50]。以金属卤化物钙钛矿材料作为吸光材料的叠层太阳能电池目前主要有钙钛矿—晶硅叠层电池、钙钛矿—钙钛矿叠层电池、钙钛矿—有机叠层电池以及钙钛矿—铜铟镓硒(Cu(In, Ga)Se₂, 简称CIGS)叠层电池等^[51]。其中，由于晶硅电池这棵大树已历经了很长一段时间的发育，积累了成熟的理论及工艺技术，并且它具有合适的带隙(约1.12 eV)，因此钙钛矿—晶硅叠层电池受到了最多的关注^[52, 53]。

钙钛矿—晶硅叠层电池的相关研究始于2014年，彼时单结的平面结构钙钛矿太阳能电池刚取得了突破性进展^[13]。Colin D. Bailie等便制备出了光电转换效率为17.9%的四端钙钛矿—晶硅叠层电池^[54]；同期，Jonathan P. Mailoa等制备出了效

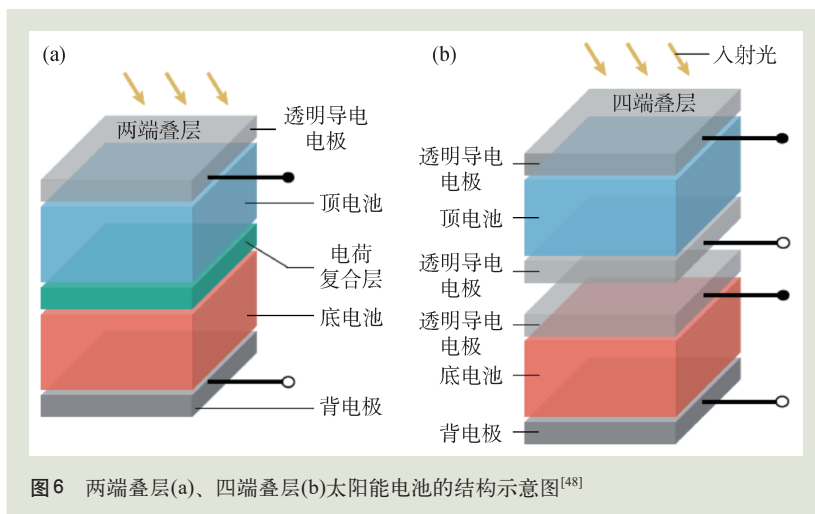


图6 两端叠层(a)、四端叠层(b)太阳能电池的结构示意图^[48]

率为13.7%的两端钙钛矿—晶硅叠层电池^[55]。得益于低寄生吸收和低成本等优势，两端叠层电池已成为目前主流的钙钛矿—晶硅叠层电池结构^[56]。如今，这种叠层电池的光电转换效率高达34.6%^[15]，已经超过了单结钙钛矿太阳能电池的SQ极限。

除了钙钛矿—晶硅叠层电池，钙钛矿—钙钛矿叠层电池因其带隙可调、成本低廉的优势，近年来发展也非常迅猛^[57, 58]。Hao-Wu Lin等^[59]在2014年提出了全钙钛矿叠层电池的概念。Dewei Zhao等^[60]通过引入氯元素，使钙钛矿吸光层的晶粒尺寸增大、乌尔巴赫能减少、载流子寿命增加，叠层电池的光电转换效率得到提升。除了卤素掺杂之外，提高单结窄带隙钙钛矿太阳能电池性能的方法还有组分工程、界面工程、溶剂工程等^[61]。

CIGS薄膜太阳能电池也是叠层电池中底电池的一种选择，其带隙可调低至约1.0 eV，能够与钙钛矿材料吸收光谱互补匹配，构建叠层电池^[62]。Teodor Todorov等人^[63]于2015年成功制备了两端钙钛矿—CIGS叠层电池。他们设计了一种原位带隙调控手段来控制MAPbX₃ (X = I, Br, Cl)的带隙(1.58—2.29 eV可调)，并将其与CIGS底电池相结合，获得了10.9%的光电转换效率。

有机太阳能电池也能与钙钛矿顶电池兼容，制备成叠层器件。同时其具备与钙钛矿材料相似的溶液可加工性、轻质性和柔性^[64, 65]。2024年，Yongfang Li等^[66]开发了一种具有手性异构的表面

钝化剂环己烷-1,4-二碘化二铵(CyDAI₂),发现其中顺式结构CyDAI₂能够显著降低宽带隙钙钛矿太阳能电池(1.88 eV)的开路电压损失,并将其开路电压提高到1.36 V,最终得到的叠层电池的光电转换效率为26.4%(认证为25.7%)。

为更精细化利用太阳光谱的能量,理论上可采用无限多不同带隙的吸光层进行堆叠。因此,两结及以上的叠层电池的理论模型与器件是近年来的研究热点。虽然三结叠层的钙钛矿电池理论光电转换效率更高,但其结构也更加复杂,各功能层制备工艺需高度兼容,器件制备难度呈“指数级”上升。但科学技术的进步恰恰是突破人类认知极限的过程,Zaiwei Wang等^[67]制备了全钙钛矿三结太阳能电池,开路电压为3.21 V,光电转换效率为24.3%(认证值23.3%),实现了钙钛矿三结电池的首个认证效率。Shunchang Liu等^[68]在1 cm²活性面积的钙钛矿—钙钛矿—硅三结太阳能电池上实现了27.62%的光电转换效率(认证值27.10%)。

4 柔性钙钛矿太阳能电池

常规的高性能钙钛矿太阳能电池通常在刚性玻璃TCO电极基底上制备。然而,刚性基底普遍重量大、易破碎,且无法弯折,因此刚性钙钛矿太阳能电池的应用场景相对受限^[69]。与此同时,进入21世纪以来,可穿戴和自供电柔性电子产品逐渐进入人类的生活中,人们对于柔性太阳能电池的需求与日俱增。而钙钛矿材料可低温加工、轻质柔韧,因此基于柔性基底可实现柔性太阳能电池,并应用于光伏建筑一体化、可穿戴设备、空间光伏等领域^[70]。此外,柔性钙钛矿太阳能电池可使用连续卷对卷(roll-to-roll)工艺进行制备加工,因此能实现大面积连续的高效生产^[71]。

目前,柔性钙钛矿太阳能电池的性能与刚性电池还有一定差距,主要原因在于柔性基底上制备高质量钙钛矿薄膜的难度较大,以及柔性电极的电学性能与机械性能均不及刚性电极。常见柔

性基底为塑料或金属箔,器件结构多为平面型,类似于刚性电池。此外,有些别出心裁的柔性电池也将在下文简要介绍。

以塑料材料作为柔性衬底是柔性钙钛矿太阳能电池的主要研究方向。塑料是生活中最常见的兼具轻质与柔性的材料,通常为高分子聚合物,非常适合用作透明电极的衬底。常用于柔性钙钛矿太阳能电池衬底的材料有聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)、聚酰亚胺(PI)或者Willow Glass柔性玻璃等^[72]。在柔性衬底上通过磁控溅射等沉积方法制备透明电极,然后在其上顺序制备钙钛矿太阳能电池各功能层,即可得到柔性钙钛矿太阳能电池。

早期柔性钙钛矿太阳能电池主要基于正式结构器件开展。M. H. Kumar等^[73]报道采用电沉积法制备致密氧化锌(ZnO)电子传输层,并在常温下通过化学浴沉积法生长ZnO纳米棒作为介孔层,获得了2.62%效率的柔性钙钛矿电池。Yingqiang Li等^[74]在PET/ITO基底上用100 °C低温工艺制备了SnO₂电子传输层,得到了效率为16.8%的柔性钙钛矿太阳能电池。

反式结构钙钛矿太阳能电池一般不需要高温(大于150 °C)的制备工艺,因此拥有较为良好的柔性衬底工艺兼容性。Lisha Xie等^[75]基于反式结构电池,在PEN/ITO基底上获得了光电转换效率高达24.08%的柔性钙钛矿太阳能电池。伴随着近年来反式结构电池的迅猛发展,反式结构柔性电池开始成为主流的技术路径,并且电池性能也在迅速提升。

太阳能电池一直以来都有对于轻质柔性的追求,我们研究团队^[76]选取厚度仅3 μm的聚对二甲苯(Parylene)膜作为柔性衬底,并在其上沉积锆(Zr)、钛(Ti)和镓(Ga)掺杂的InO_x作为透明导电电极,最终制备出的柔性钙钛矿太阳能电池的光电转换效率为20.2%(图7)。凭借着Parylene衬底远低于常规柔性衬底厚度(约100 μm)的超轻薄特性,此柔性钙钛矿太阳能电池实现了30.3 W·g⁻¹的超高能质比(发电功率与质量的比值)。

部分金属因具有良好的延展性和导电性，也适合作为柔性太阳能电池的衬底。Minoh Lee等^[77]采用钛金属箔为基底，银薄膜为半透明顶电极，制得了效率超6%的柔性钙钛矿电池。Thomas M. Brown等^[78]别出心裁地将生活中最常见的柔性材料——纸张，作为衬底来制备柔性钙钛矿太阳能电池，并分别以金/二氧化锡和氧化钼/金/氧化钼叠层作为底电极及半透明顶电极，最终实现了2.7%的光电转换效率。除了平面结构外，柔性衬底的可弯折特性也可用于构建立体结构电池，适用于可穿戴设备。Huisheng Peng等^[79]以不锈钢丝为金属电极，碳纳米管薄膜为透明电极，通过浸渍涂布法制得纤维状钙钛矿电池，效率达3.3%。Dechun Zou等^[80]则利用钛金属丝为电极，结合自设计涂布装置在其表面依次构建功能层，实现7.5%的光电转换效率。

5 钙钛矿太阳能电池的应用与产业化

钙钛矿太阳能电池经过十余年的发展，在光电转换效率和器件稳定性提升以及大面积制备等方面均取得显著进展。不过“纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行”，一项新技术要真正走出论文图表，转化为提高生产力、改善人类生活的产品，还需要研究人员在产业化、应用化方面的不懈努力，即科学研究需要和成果转化相辅相成发展，才能不忘做科研的初心。近十年，钙钛矿产业新

势力在全球，尤其在中国如雨后春笋般涌现，如厦门惟华(现为苏州协鑫纳米)、杭州纤纳光电、无锡极电光能、苏州仁烁光能和英国牛津光伏等。同时，众多传统能源巨头，如中国华能、三峡集团、中国华电和上海电气等，以及光伏领域的常青树，如隆基绿能、天合光能等也凭借雄厚资金与技术储备，积极布局钙钛矿产业化。

钙钛矿太阳能电池具有轻质、柔性等特点，同时在弱光环境下表现出相对优异的光电转换性能，其下游应用场景非常广阔^[81—86]，如图8所示。(1)光伏建筑一体化(BIPV)^[87]：可通过调控材料带隙和结构，实现彩色半透明设计，应用于发电幕墙或发电石材。(2)车顶光伏^[82]：汽车对面积及重量相对敏感，轻质钙钛矿电池组件成为理想选择。(3)移动设备和电子产品^[88]：钙钛矿电池低温即可制备，适于刚性和柔性的应用场景，与可穿戴电子产品的兼容性更好；同时，由于钙钛矿材料是直接带隙半导体，且吸光系数较高，可制备出兼具发光/发电双模式的钙钛矿光电器件^[83, 89]，有望应用于自供电的LED显示设备。(4)物联网传感器^[90]：钙钛矿电池的弱光发电性能好，可为室内传感器提供稳定电力，助力设备轻量化与长效运行。(5)大型地面电站及分布式光伏^[91, 92]：钙钛矿电池理论的光电转换效率高，且可以与晶硅电池叠层实现更高的光电转换效率，与晶硅光伏产业实现匹配衔接，未来在光伏电站场景具有较大发展潜力。(6)空间光伏^[93]：钙钛矿电池具有优异的

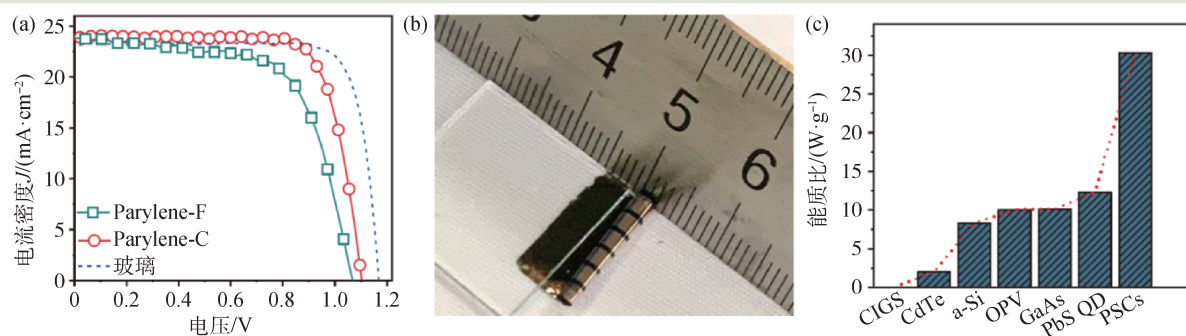


图7 (a)在超轻柔基底上制备的钙钛矿电池的 J — V 特性曲线；(b)柔性钙钛矿电池弯折时(曲率半径为1 mm)的光学照片；(c)基于Parylene的超轻柔电池(PSCs)与其他高能质比太阳能电池的比较^[76]

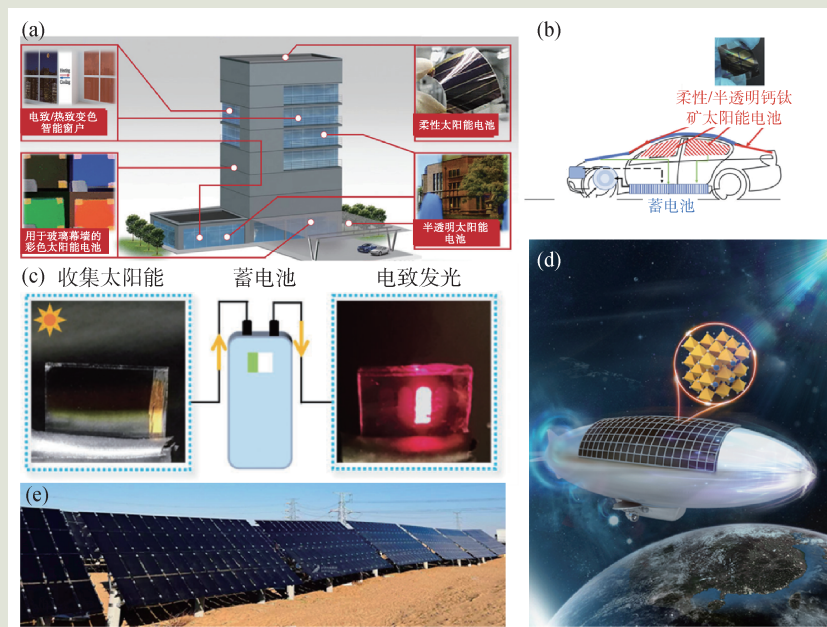


图8 钙钛矿太阳能电池的应用场景 (a)光伏建筑一体化^[81]; (b)车载光伏^[82]; (c)钙钛矿太阳能电池/钙钛矿发光二极管双模器件^[83]; (d)钙钛矿太阳能电池在空间光伏中的应用^[84]; (e)基于钙钛矿太阳能电池的大型地面电站^[85]

光电转换效率、能质比、柔性衬底兼容性以及耐辐射性，适合作为空间电源系统的太阳能模块。在相关研究中，Jean V. Manca 等人^[94]和我们研究团队^[84]分别将钙钛矿太阳能电池搭载于浮空器，在临近空间真实环境中对其进行了初步测试，开展了引领性的研究探索，开启其迈向地外的新篇章。

6 总结与展望

从21世纪初至今，我国的光伏行业经历了一场场跌宕起伏的冒险旅程：它先是蹒跚学步，然后茁壮成长，接着迎来了成长的烦恼，跌了几个小跟头，每次摔倒后都会拍拍尘土重新站起来，在迈向成熟的道路上踔厉奋发、砥砺前行。2000年初，随着政府政策出台，中国光伏行业开始萌芽，2004年到2009年逐步发展。2010年到2012年，因欧美“双反”政策陷入短暂低谷，2013年开始逐步回暖。2018年后，光伏政策不断调整，相关技术不断迭代，吐故纳新，行业进入波动成长阶段。2021年，碳达峰、碳中和在全国两会上

首次被写入国务院政府工作报告，中国正式开启“双碳”元年。目前，我国已位居全球光伏新增装机容量首位，行业前景可期。

当前，晶硅太阳能电池仍是光伏市场的绝对主流，深蓝色的面板铺设在我国北部的草原、西部的荒漠、南部的鱼塘和山坡、东部的岛屿和海洋，向着阳光，欢快地接受着大自然的馈赠，输送着绿色的能量。而钙钛矿太阳能电池近年来异军突起，在光电转换效率、平均度电成本等核心指标上已逐步接近晶硅电池。国内外众多高校、科研机构和产业力量也

纷纷投入相关研究，领域迅速升温，高质量研究成果产出和高水平学术论文发表犹如井喷，相关的科研支持也不断上涨。我们认为钙钛矿太阳能电池未来的发展定位主要有以下三方面可能。

(1) 与硅太阳能电池竞争。钙钛矿太阳能电池近年来不断刷新光电转换效率纪录激发了人们对其撼动硅基光伏技术山河的期待。相比于硅基光伏，钙钛矿技术具有更质优价廉的成本潜力，因此众多科技公司坚定且昂扬地在这条道路上奋勇前行。当前，单结钙钛矿太阳能电池已经接近硅电池最佳水平，而曾被广为诟病的稳定性问题，也在持续改善。同时，我国近年在“全钙钛矿叠层太阳能电池”技术上不断突破，其效率已超过硅电池，这也再次刷新人们的期望。然而，作为光伏产业的“巨人”，硅电池仍占据主导地位，钙钛矿要想正面竞争，仍面临重重挑战，路阻且长，其修远兮。

(2) 与硅太阳能电池联合。钙钛矿太阳能电池的一大显著优势是可以简便地调控对太阳光的响应区域。硅电池发展了半个多世纪，几乎到达了性能顶点，如想继续进步，需考虑借助新的力量。

构筑“钙钛矿—硅”叠层太阳能电池，利用钙钛矿与硅响应光谱的互补，就能实现电池性能的进一步提升。站在巨人的肩膀上，“钙钛矿”能走得更远更长。目前，这种叠层电池的光电转换效率已超34%，突破35%指日可待，受到光伏行业广泛关注。诸多硅太阳能电池企业已在该方向有所布局。一些钙钛矿电池初创企业也在这条路上走得很是欢畅。这条路，硅愿意，钙钛矿也愿意，两厢情愿，自然姻情绵长。后续二者在稳定性提升、工艺成本压缩、铅污染防控等方面做好叠加匹配，未来可期。

(3) 另辟蹊径，扬长避短。除了以上两方面，还可以考虑“另辟蹊径”的创新原则，发掘“互补应用”的创新需求，探索“扬长避短”的创新路线，发挥钙钛矿电池轻质、柔性、高能质比等独特优势，这也是我们研究团队近年来不断深耕的方向。如便携式应用领域，其高效轻柔的特点就极具吸引力。此外，近年来钙钛矿在空间应用方面亦展现潜力：太空环境可规避其对水氧敏感的问题，铅污染也无需过度担忧。研究发现，钙钛矿材料能够在空间高能粒子辐照下保持良好的稳定性，这似是大自然赋予它的又一个先天优势。此外，能质比在航天中至关重要。目前，钙钛矿太阳能电池能质比已突破 $30 \text{ W} \cdot \text{g}^{-1}$ ，意味着仅一

个橘子重的电池片，在一个标准太阳光照射下，就足够驱动一台电磁炉来涮火锅了，其数值为现有砷化镓类空间太阳能电池的近十倍，更是普通硅太阳能电池的上百倍。畅想未来，当我们向地外基地发射火箭输送太阳能电池板时，同等质量的新型电池将有望产生多十倍的能量。这类差异化应用场景，将可能成为钙钛矿技术未来增长的关键突破口。

站在潮头浪尖的钙钛矿太阳能电池虽然潜力无限、风光无限，但是也风险无限，激昂和困惑交织在每个“挖矿人”的心头。风险来自若干可能制约钙钛矿太阳能电池发展的关键因素：(1) 电池的稳定性问题，钙钛矿太阳能电池在工作环境下依旧存在明显的效率衰减问题；(2) 吸光层中含有可溶性重金属铅，对环境有潜在的污染风险；(3) 虽然实验室制备的电池具有可媲美硅电池的高效率水平，但是组件级别的大面积电池性能还与晶硅电池尚存在很大差距，需不断优化工艺以实现高效规模化制备；(4) 钙钛矿太阳能电池的基础科学研究还有待增强，仍需层层揭开底层的机理“面纱”。不过我们相信，在科研界与产业界共同的努力下，这些问题终会被一一解决，那时钙钛矿太阳能电池将能够为人类提供廉价、清洁、高效的能源，“赋能”我们生产生活的方方面面。

参考文献

- [1] Einstein A. *Annalen der Physik*, 1905, 322: 132
- [2] Park N G, Grätzel M, Miyasaka T. *Organic-Inorganic Halide Perovskite Photovoltaics*. Springer, 2016
- [3] Reference Air Mass 1.5 Spectra. <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5>
- [4] Luo D, Su R, Zhang W *et al.* *Nature Reviews Materials*, 2020, 5: 44
- [5] Kieslich G, Sun S, Cheetham A K. *Chemical Science*, 2014, 5: 4712
- [6] Kim J Y, Lee J W, Jung H S *et al.* *Chem. Rev.*, 2020, 120: 7867
- [7] Weber D. *Zeitschrift für Naturforschung B*, 1978, 33: 1443
- [8] Filip M R, Eperon G E, Snaith H J *et al.* *Nat. Commun.*, 2014, 5: 5757
- [9] Prasanna R *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 2017, 139: 11117
- [10] Hu Z *et al.* *Solar RRL*, 2019, 3: 1900304
- [11] Kojima A, Teshima K, Shirai Y *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 2009, 131: 6050
- [12] Im J H, Lee C R, Lee J W *et al.* *Nanoscale*, 2011, 3: 4088
- [13] Lee M M, Teuscher J, Miyasaka T *et al.* *Science*, 2012, 338: 643
- [14] Kim H S *et al.* *Scientific Reports*, 2012, 2: 591
- [15] M. NREL PV Research Cell Record Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed: 2025)
- [16] Xing G *et al.* *Science*, 2013, 342: 344
- [17] Stranks S D *et al.* *Science*, 2013, 342: 341
- [18] Yu S *et al.* *Science*, 2023, 382: 1399
- [19] Zhu R. *Nature Energy*, 2020, 5: 123
- [20] Zhang W *et al.* *Advanced Materials*, 2024, 36: 2311025
- [21] Liu L *et al.* *Scientific Reports*, 2013, 3: 2413
- [22] Liu J *et al.* *Science*, 2024, 383: 1198
- [23] Chen W *et al.* *Energy & Environmental Science*, 2015, 8: 629

- [24] Li Q *et al.* *Nature Energy*, 2024, 9: 1506
- [25] Yang X *et al.* *Advanced Materials*, 2020, 32: 2002585
- [26] Arora N *et al.* *Science*, 2017, 358: 768
- [27] Park J *et al.* *Nature*, 2023, 616: 724
- [28] Heo J H, Han H J, Kim D *et al.* *Energy & Environmental Science*, 2015, 8: 1602
- [29] Mazumdar S, Zhao Y, Zhang X. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, 66: 217304
- [30] Jeng J Y *et al.* *Advanced Materials*, 2013, 25: 3727
- [31] Chen K *et al.* *Advanced Materials*, 2016, 28: 10718
- [32] Zhao L *et al.* *Advanced Functional Materials*, 2016, 26: 3508
- [33] Luo D *et al.* *Advanced Materials*, 2017, 29: 1604758
- [34] Luo D *et al.* *Science*, 2018, 360: 1442
- [35] Magomedov A *et al.* *Advanced Energy Materials*, 2018, 8: 1801892
- [36] Zhang S *et al.* *Science*, 2023, 380: 404
- [37] Al-Ashouri A *et al.* *Science*, 2020, 370: 1300
- [38] Xiao M *et al.* *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53: 9898
- [39] Xiao Z *et al.* *Energy & Environmental Science*, 2014, 7: 2619
- [40] Chen B, Rudd P N, Yang S *et al.* *Chem. Soc. Rev.*, 2019, 48: 3842
- [41] Jiang Q *et al.* *Nature Photonics*, 2019, 13: 460
- [42] Zhou B *et al.* *Research*, 2024, 7: 0309
- [43] Yang X *et al.* *Advanced Materials*, 2021, 33: 2006435
- [44] Liu S *et al.* *Nature*, 2024, 632: 536
- [45] Shockley W, Queisser H J. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32: 510
- [46] Polman A, Knight M, Garnett E C *et al.* *Science*, 2016, 352: aad4424
- [47] Meier J, Flückiger R, Keppner H *et al.* *Applied Physics Letters*, 1994, 65: 860
- [48] Duan L *et al.* *Nature Reviews Materials*, 2023, 8: 261
- [49] Wu X, Li B, Zhu Z *et al.* *Chem. Soc. Rev.*, 2021, 50: 13090
- [50] Ramadan A J, Oliver R D J, Johnston M B *et al.* *Nature Reviews Materials*, 2023, 8: 822
- [51] 崔兴华 等. *物理学报*, 2020, 69: 7401
- [52] 张美荣 等. *物理学报*, 2023, 72: 8801
- [53] Aydin E *et al.* *Science*, 2024, 383: eadh3849
- [54] Bailie C D *et al.* *Energy & Environmental Science*, 2015, 8: 956
- [55] Mailoa J P *et al.* *Applied Physics Letters*, 2015, 106: 121105
- [56] 李梓进, 王维燕, 李红江 等. *材料导报*, 2020, 34: 21061
- [57] Wang Y *et al.* *Journal of Semiconductors*, 2020, 41(5): 051201
- [58] Wen J, Tan H. *Science China Materials*, 2022, 65: 3353
- [59] Chen C W *et al.* *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3: 9152
- [60] Zhao D *et al.* *Nature Energy*, 2018, 3: 1093
- [61] 王俪璇 等. *物理学报*, 2021, 70: 8401
- [62] Chirilă A *et al.* *Nat. Mater.*, 2011, 10: 857
- [63] Todorov T *et al.* *Advanced Energy Materials*, 2015, 5: 1500799
- [64] 占肖卫, 李腾飞. *化学学报*, 2021, 79: 257
- [65] Brinkmann K O *et al.* *Nature Reviews Materials*, 2024, 9: 202
- [66] Jiang X *et al.* *Nature*, 2024, 635: 860
- [67] Wang Z *et al.* *Nature*, 2023, 618: 74
- [68] Liu S *et al.* *Nature*, 2024, 628: 306
- [69] 张美合, 李志浩, 李红刚 等. *力学进展*, 2022, 52: 311
- [70] Jung H S, Han G S, Park N G *et al.* *Joule*, 2019, 3: 1850
- [71] Hwang K *et al.* *Advanced Materials*, 2015, 27: 1241
- [72] Aftab S *et al.* *Nano Energy*, 2024, 120: 109112
- [73] Kumar M H *et al.* *Chem. Commun.*, 2013, 49: 11089
- [74] Li Y *et al.* *Organic Electronics*, 2019, 65: 19
- [75] Xie L *et al.* *Energy & Environmental Science*, 2023, 16: 5423
- [76] Wu J *et al.* *Science China Materials*, 2022, 65: 2319
- [77] Lee M, Jo Y, Kim D S *et al.* *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3: 4129
- [78] Castro-Hermosa S, Dagar J, Marsella A *et al.* *IEEE Electron Device Letters*, 2017, 38: 1278
- [79] Qiu L, Deng J, Lu X *et al.* *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53: 10425
- [80] Dong B *et al.* *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4: 1900131
- [81] Batmunkh M, Zhong Y L, Zhao H. *Advanced Materials*, 2020, 32: 2000631
- [82] Nukunudompanich M, Sriprapai D, Sontikaew S. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 66: 3163
- [83] Chen P *et al.* *Advanced Materials*, 2023, 35: 2208178
- [84] Tu Y *et al.* *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62: 974221
- [85] 纤纳光电. <https://www.microquanta.com/newsinfo>
- [86] Rong Y *et al.* *Science*, 2018, 361: eaat8235
- [87] Koh T M *et al.* *Advanced Materials*, 2022, 34: 2104661
- [88] Yoon J *et al.* *Chem. Soc. Rev.*, 2021, 50: 12915
- [89] Luo M, Tarasov A, Zhang H *et al.* *Nature Reviews Materials*, 2024, 9: 295
- [90] Wang K L, Zhou Y H, Lou Y H *et al.* *Chemical Science*, 2021, 12: 11936
- [91] Gao L, Chen L, Huang S *et al.* *ACS Applied Energy Materials*, 2019, 2: 3851
- [92] Zhang X *et al.* *Advanced Science*, 2021, 8: 2100552
- [93] Tu Y *et al.* *Advanced Materials*, 2021, 33: 2006545
- [94] Cardinaletti I *et al.* *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 182: 121