

钙钛矿电池行业深度研究报告

钙钛矿产业化进程提速，奔赴星辰大海

- 钙钛矿是第三代太阳能电池，发展前景广阔。钙钛矿电池因其光电转换层使用钙钛矿结构的材料而得名，指通用化学式为  $ABX_3$  的一类材料，具有轻质、柔性、弱光性高等特点。钙钛矿电池应用场景较晶硅更为广阔，可应用于光伏建筑一体化、车顶光伏、移动设备、联网传感器、光伏电站等众多领域。转换效率方面，单结钙钛矿电池最大理论转换效率为 33%，接近单结电池理论转换效率极限 33.7%，多结电池组成的叠层电池转换效率将进一步提升。近年来钙钛矿发展迅猛，转换效率快速跃升，据 NREL，单结钙钛矿电池效率纪录达 26.1%，晶硅-钙钛矿叠层电池销量纪录达 33.9%。
- 钙钛矿制备工艺暂未标准化，镀膜及涂布为核心设备。钙钛矿生产过程中涉及的设备主要有镀膜设备、涂布设备、激光设备、封装设备等四大类，其中镀膜设备价值量占比最高，激光设备工艺确定性最强。以反式结构的单结钙钛矿电池为例，钙钛矿层、空穴传输层、电子传输层、电极层的主流工艺分别为狭缝涂布、磁控溅射 (PVD)、反应式等离子镀 (RPD)、磁控溅射 (PVD)。钙钛矿电池的制备过程通常需要四道激光程序，主要作用是刻蚀和清边，激光工序的损伤缺陷和切面平整程度会直接影响电池的寿命和转换效率，因此对精度要求较高。从目前的产业实践来看，各企业的制备工艺存在差异，通常会在质量与经济性之间权衡，最终方案暂未标准化。
- 钙钛矿电池产业化潜力突出，大面积制备及稳定性仍需突破。(1) 产业化优势。制造链条相较于晶硅显著缩短，生产效率明显提升，钙钛矿从原材料到组件成品产出仅需要 45 分钟左右，而晶硅组件从硅料到成品大约需要三天。另一方面，钙钛矿的制备条件温和，工艺温度不超过 150℃，可有效降低生产能耗。(2) 产业化难点。钙钛矿材料存在长期稳定性问题，目前寿命相对较短，理论使用寿命约 5-15 年，明显低于晶硅组件的 25 年。另一方面，制备大面积钙钛矿电池存在效率损失，制造工艺难度大。(3) 成本及效率有望持续突破。据极电光能，百兆瓦级产线钙钛矿组件制造成本约 1.5-1.6 元/W，相较于晶硅组件成本仍然较高。钙钛矿处于产业化前期，后续可通过技术进步以及规模化进一步降本，预计 GW 级规模时成本或将降至 0.9 元/W 左右；预计 10GW 级规模时或将进一步下降。
- 钙钛矿技术逐步渗透，有望带动设备及钙钛矿组件市场规模快速增长。(1) 设备市场空间。假设 2024-2030 年钙钛矿渗透率由 0.2% 逐步提升至 15.5%，大规模量产钙钛矿设备投资额下降至 5 亿元/GW 左右，我们预计到 2030 年全球钙钛矿设备新增市场空间将达到 830.6 亿元，2024-2030 年 CAGR 约 80%。(2) 钙钛矿组件市场空间。我们预计到 2030 年全球钙钛矿组件市场空间有望达到 1816 亿元，2024-2030 年 CAGR 约 108%。
- 钙钛矿叠层或将为理想路径，当前各企业以百兆瓦级中试线为主。钙钛矿电池发展路径预计将从单层结构向四端叠层过渡，两端叠层或将成为未来理想技术路线。其中钙钛矿/HJT 叠层具有工艺温度低、工艺路线与晶硅相容、转换效率高等优势，或为未来的更优解。目前，各企业以百兆瓦级中试线为主，国内已有协鑫光电、纤纳光电、极电光能等多条百兆瓦级的钙钛矿组件中试线建成投产，众能光电、光晶能源等众多企业已开启百兆瓦级中试线建设。另外，多条 GW 级产线正在规划推进中，预计协鑫光电、极电光能的 GW 级产线，有望于 2024 年陆续落地投产。
- 投资建议：考虑到钙钛矿行业发展迅猛，市场空间广阔，已有部分上市公司前瞻布局，建议关注产业链相关公司，迈为股份、协鑫科技、捷佳伟创、京山轻机、曼恩斯特等（市值排序）。
- 风险提示：终端需求不及预期，产能扩张不及预期，钙钛矿渗透率不及预期，市场竞争加剧，相关测算具有一定主观性等。

推荐（维持）

华创证券研究所

证券分析师：黄麟

邮箱：huanglin1@hcyjs.com

执业编号：S0360522080001

证券分析师：盛炜

邮箱：shengwei@hcyjs.com

执业编号：S0360522100003

联系人：蒋雨凯

邮箱：jiangyukai@hcyjs.com

行业基本数据

		占比%
股票家数(只)	38	0.00
总市值(亿元)	11,866.53	1.46
流通市值(亿元)	9,364.08	1.48

相对指数表现

%	1M	6M	12M
绝对表现	4.9%	-25.6%	-45.3%
相对表现	6.7%	-11.8%	-23.7%



相关研究报告

《光伏行业周报(20240115-20240121): EIA 上修 24 年美国光伏装机预期，相关产业链公司有望受益》

2024-01-22

《光伏行业周报(20240108-20240114): EVA 粒子价格触底回升，胶膜环节盈利或将底部向上》

2024-01-14

《光伏行业周报(20240101-20240107): 2023 年德国光伏装机维持高增，有望延续高景气》

2024-01-08

## 投资主题

### 报告亮点

本篇报告从钙钛矿工艺设备、产业化潜力以及市场空间等角度详细分析了钙钛矿电池行业的基本面情况，并梳理了潜在的投资机会。(1)对钙钛矿发展历程进行了梳理；(2)结合产业情况，对目前主流的生产工艺以及设备进行了详细介绍。(3)从产业化角度，对目前钙钛矿电池的优劣势进行了分析，并对未来可能降本增效的空间进行了测算。(4)分别对钙钛矿设备、材料、组件等市场规模进行了测算；(5)梳理了目前钙钛矿电池行业的产业化进展。

### 投资逻辑

**钙钛矿理论转换效率高、应用场景广阔，或将成为下一代光伏电池技术。**单结钙钛矿太阳能电池的理论转换效率达 33%，明显高于晶硅的 29.4%，并且可以与晶硅电池组成叠层电池，转换效率还将进一步提升。钙钛矿具有轻质、柔性、弱光性高等特点，应用场景更为广阔。产业前景来看，高生产效率和低能耗的优势奠定了钙钛矿电池的产业化基础，但目前仍面临稳定性与大面积制备等痛点，未来随着技术进步以及产能规模的不断扩张，成本及效率有望持续突破。

**钙钛矿已经进入产业化前期，行业发展迅猛。**历经十多年的发展，单结钙钛矿电池效率由 3.8% 跃升至 26.1%。目前，国内已有协鑫光电、纤纳光电、极电光能等多条百兆瓦级的钙钛矿组件中试线建成投产，众能光电、光晶能源等众多企业已开启百兆瓦级中试线建设，协鑫光电、极电光能等企业的 GW 级产线正在规划推进中，有望于 2024 年开始陆续落地投产。

**随着钙钛矿技术的逐渐渗透，有望带动设备及组件市场规模快速增长。**我们预计到 2030 年全球钙钛矿设备新增市场空间将达到 830.6 亿元，2024-2030 年 CAGR 约 80%；预计到 2030 年全球钙钛矿组件市场空间将达到 1816 亿元，2024-2030 年 CAGR 约 108%，设备及钙钛矿组件的相关企业有望受益。

### 投资建议

考虑到钙钛矿行业发展迅猛，市场空间广阔，已有部分上市公司前瞻布局，建议关注产业链相关公司，迈为股份、协鑫科技、捷佳伟创、京山轻机、曼恩斯特等（市值排序）。

# 目 录

<b>一、 钙钛矿是第三代太阳能电池技术，发展前景广阔</b> .....	<b>7</b>
(一) 钙钛矿电池因其光电转换层材料得名，下游应用场景丰富.....	7
(二) 工作原理与晶硅电池类似，材料体系灵活可设计性强.....	9
(三) 叠层电池光谱响应范围更宽，进一步打开转换效率的天花板.....	11
(四) 钙钛矿电池目前正处于快速成长期，转换效率不断突破.....	12
<b>二、 钙钛矿制备工艺暂未标准化，镀膜及涂布为核心设备</b> .....	<b>13</b>
(一) 钙钛矿层制备的主流工艺为狭缝涂布，蒸镀发展潜力大.....	14
(二) 电荷传输层以及电极层的制备通常采用 PVD 工艺.....	16
(三) 钙钛矿电池通常需要四道激光工序，对精度要求高.....	18
(四) 封装阻隔性能要求高，可对标 OLED 封装.....	18
<b>三、 钙钛矿电池产业化潜力突出，大面积制备及稳定性仍需突破</b> .....	<b>19</b>
(一) 高生产效率和低能耗的优势奠定钙钛矿产业化基础.....	19
1、 制造链条相较于晶硅显著缩短，生产效率明显提升.....	19
2、 工艺温度不超过 150°C，生产过程中能耗较少.....	20
(二) 稳定性和大面积制备仍是钙钛矿电池产业化亟需解决的难题.....	20
1、 钙钛矿材料存在长期稳定性问题，目前寿命相对较短.....	20
2、 制备大面积钙钛矿电池存在效率损失，制造工艺要求高.....	21
(三) 成本及效率有望持续突破，钙钛矿电池产业化潜力突出.....	22
1、 当前钙钛矿成本仍然较高，技术进步以及规模化有望助力降本.....	22
2、 材料端有较大的降本空间，设备投资或将低于晶硅.....	23
3、 转换效率提升空间大，成本有望全面摊薄.....	24
4、 钙钛矿原材料可设计性强，具有较大发展潜力.....	25
<b>四、 钙钛矿技术逐步渗透，有望带动设备及钙钛矿组件市场规模快速增长</b> .....	<b>26</b>
(一) 钙钛矿快速发展，带动设备及材料市场规模快速增长.....	26
1、 钙钛矿设备市场空间测算.....	26
2、 钙钛矿材料市场空间测算.....	27
(二) 随着钙钛矿迈向产业化，预计将带动市场规模高增.....	27
<b>五、 钙钛矿叠层或将为理想路径，当前各企业以百兆瓦级中试线为主</b> .....	<b>29</b>
(一) 两端叠层钙钛矿电池有望成为理想技术路径.....	29
(二) 目前以百兆瓦级中试线为主，多条 GW 级产线正在规划推进中.....	30
<b>六、 重点公司介绍</b> .....	<b>31</b>
(一) 迈为股份：HJT 设备龙头，前瞻布局钙钛矿/HJT 叠层设备.....	31
(二) 协鑫科技：协鑫光电钙钛矿布局领先，GW 级产线有望于 24 年落地.....	32

（三）捷佳伟创：设备布局全面，具备整线供应能力 .....	33
（四）京山轻机：先行布局钙钛矿设备领域，打开新成长曲线 .....	35
（五）曼恩斯特：本土锂电涂布模头领军企业，已推出钙钛矿涂布整机设备.....	37
<b>七、风险提示 .....</b>	<b>39</b>

## 图表目录

图表 1	钙钛矿太阳能电池属于第三代电池技术 .....	7
图表 2	典型的钙钛矿材料晶格结构 .....	8
图表 3	钙钛矿电池应用场景更为广阔 .....	8
图表 4	钙钛矿太阳电池的基本结构 .....	9
图表 5	钙钛矿太阳电池的工作原理 .....	9
图表 6	钙钛矿电池结构通常有正式介孔结构、正式平面结构、反式平面结构 .....	9
图表 7	通过调整钙钛矿材料带隙可优化转换效率 .....	10
图表 8	钙钛矿太阳能电池原材料大多为基础化工材料 .....	11
图表 9	叠层电池光谱响应范围更宽 .....	11
图表 10	按堆叠和电极连接方式不同双结叠层电池通常可分为四类 .....	12
图表 11	钙钛矿太阳能电池发展迅速 .....	13
图表 12	钙钛矿太阳能电池转换效率快速追赶晶硅电池 .....	13
图表 13	钙钛矿制备工艺及所用设备暂未标准化 .....	14
图表 14	不同的钙钛矿薄膜制备方法及其优、缺点 .....	14
图表 15	钙钛矿层制备工艺示意图 .....	15
图表 16	大面积钙钛矿薄膜制备技术对比 .....	16
图表 17	物理气相沉积（PVD）的主要工艺对比 .....	17
图表 18	钙钛矿太阳能电池制备过程中的 P1-P3 激光刻蚀 .....	18
图表 19	钙钛矿电池常见的封装方式 .....	19
图表 20	相较于晶硅组件钙钛矿组件生产链条显著缩短 .....	19
图表 21	钙钛矿组件最高工艺温度不超过 150°C .....	20
图表 22	钙钛矿组件单瓦生产能耗约 0.12KWh/W .....	20
图表 23	钙钛矿太阳能电池稳定性的影响因素 .....	20
图表 24	典型钙钛矿材料 MAPbI <sub>3</sub> 在光和氧气作用下降解 .....	21
图表 25	钙钛矿电池效率随面积增加而下降的幅度更大 .....	22
图表 26	激光划线的死区越小钙钛矿电池转换效率越高 .....	22
图表 27	钙钛矿电池有望持续降本增效 .....	23
图表 28	目前中试线钙钛矿组件成本明显高于量产晶硅组件成本 .....	23
图表 29	纤纳光电 20MW 及 100MW 产线投资额对比（万元） .....	24
图表 30	纤纳光电 100MW 中试线投资中钙钛矿产线设备占比约 79% .....	24
图表 31	钙钛矿电池转换效率提升空间大 .....	24
图表 32	不同钙钛矿材料对应的光电性能差异明显 .....	25
图表 33	预计 2024 年至 2030 年钙钛矿设备新增市场空间 CAGR 达 80% .....	26

图表 34	钙钛矿设备企业梳理 .....	26
图表 35	钙钛矿材料市场空间有望快速增长 .....	27
图表 36	大规模量产后钙钛矿光伏电站 LCOE 预计将低于晶硅组件 .....	28
图表 37	预计 2030 钙钛矿组件市场空间达 1816 亿元，2024-2030 年 CAGR 约 108% .....	28
图表 38	钙钛矿电池单层、两端与四段叠层结构 .....	29
图表 39	TOPCon/HJT 的钙钛矿叠层技术方案对比 .....	29
图表 40	国内企业钙钛矿项目推进情况 .....	30
图表 41	迈为股份 2023Q1-3 实现营收 51.07 亿元，同比+69.35% .....	31
图表 42	迈为股份 2023Q1-3 实现归母净利润 7.14 亿元，同比+3.88% .....	31
图表 43	迈为股份 2023Q1-3 盈利水平受费用前置影响略有下滑 .....	32
图表 44	协鑫科技 2023H1 实现主营收入 209.46 亿元，同比+38% .....	33
图表 45	协鑫科技 2023H1 实现归母净利润 55.18 亿元，同比-20% .....	33
图表 46	协鑫科技 2023H1 毛利率为 41.91%，同比-5.95pct .....	33
图表 47	2023Q1-3 捷佳伟创实现营业收入 64.05 亿元，同比+50.48% .....	34
图表 48	2023Q1-3 捷佳伟创实现归母净利润 12.23 亿元，同比+48.69% .....	34
图表 49	近年来捷佳伟创毛利率与净利率稳中有升 .....	34
图表 50	京山轻机主要光伏装备产品 .....	35
图表 51	京山轻机是钙钛矿设备的先行者 .....	36
图表 52	京山轻机 2023Q1-3 实现营收 49.54 亿元，同比+59.40% .....	36
图表 53	京山轻机 2023Q1-3 实现归母净利润 2.98 亿元，同比+48.4% .....	36
图表 54	京山轻机综合毛利率与净利率整体稳定 .....	37
图表 55	曼恩斯特涂布产品种类丰富 .....	37
图表 56	曼恩斯特 2023Q1-3 实现营收 5.61 亿元，同比+71.12% .....	38
图表 57	曼恩斯特 2023Q1-3 实现归母净利润 2.51 亿元，同比+84.42% .....	38
图表 58	曼恩斯特盈利能力整体稳定 .....	38

## 一、钙钛矿是第三代太阳能电池技术，发展前景广阔

### （一）钙钛矿电池因其光电转换层材料得名，下游应用场景丰富

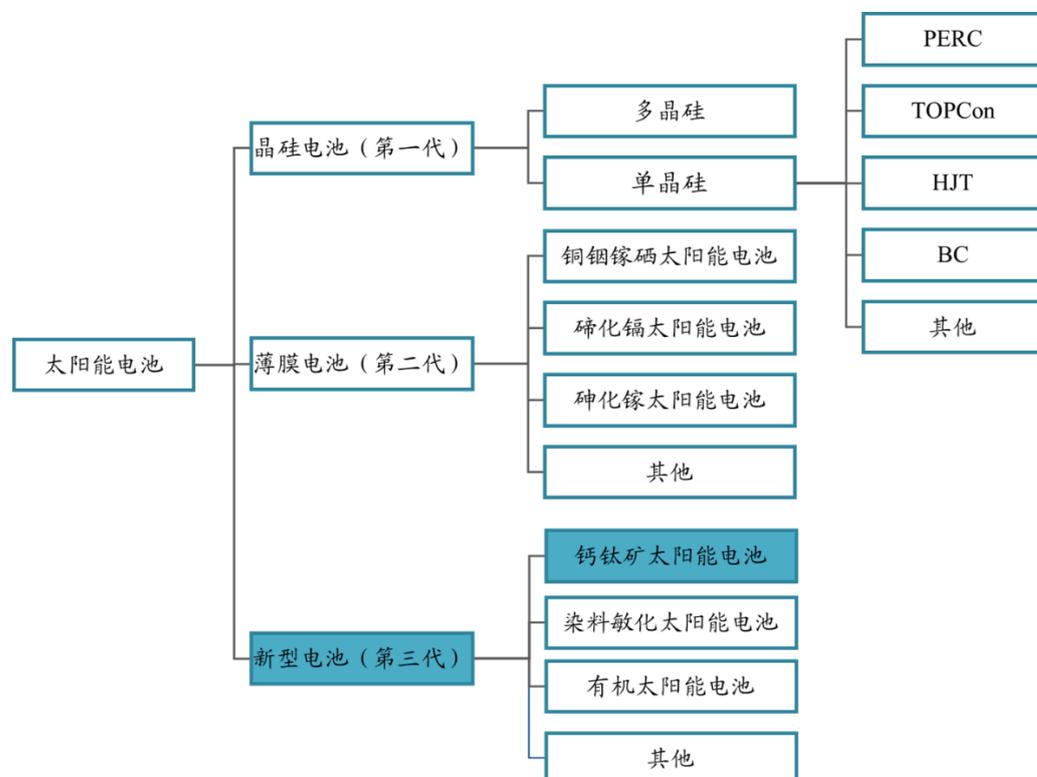
太阳能电池是一种将太阳光转换为电能和设备，可以利用光子的能量，通过光电效应产生电流。从发展过程来看，通常将太阳能电池技术分为三代：

（1）**第一代晶硅电池**，主要以多晶硅、单晶硅电池为代表，目前技术成熟度、光电转换效率和商业化程度均相对较高。目前，晶硅电池技术在光伏市场占据主导地位，占市场份额 90% 以上。目前，第一代晶硅电池的实验室转换效率越来越接近其理论效率极限 29.4%，提升空间有限。

（2）**第二代多元化合物薄膜电池**，主要包括砷化镓（GaAs）、铜铟镓硒（CIGS）、碲化镉（CdTe）、磷化铟（InP）等类型的太阳能电池。这类电池原材料消耗低、质量更轻、活性材料灵活性高，可以满足多种不同应用需求。转换效率方面处于较高水平，单结 GaAs 电池可达 28%-30%。但由于这类电池使用的部分活性材料具有毒性或储量稀少，大规模量产仍存在难度。

（3）**第三代新型电池**，主要包括钙钛矿太阳能电池、染料敏化太阳能电池、有机太阳能电池、量子点太阳能电池等。这类电池具备原料无毒、储量丰富、成本低、工艺简单且可柔性制备等多重优点。其中单结钙钛矿太阳能电池的理论转换效率达 33%，与晶硅电池组成叠层电池后，转换效率还将进一步提升，未来发展前景广阔。目前行业大多仍处于中试线阶段，部分领先企业将陆续启动 GW 级产线建设。

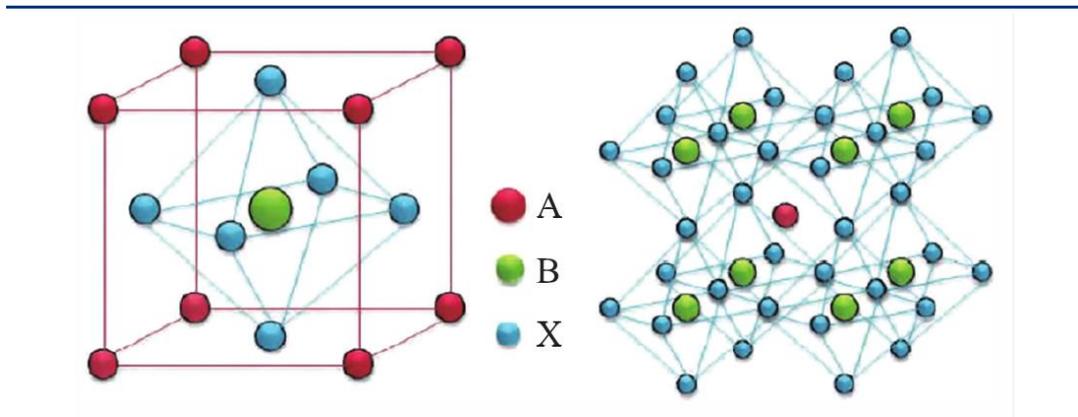
图表 1 钙钛矿太阳能电池属于第三代电池技术



资料来源：《低成本制备高效率钙钛矿太阳能电池的研究》吕凤，华创证券

钙钛矿电池因其光电转换层使用钙钛矿结构的材料而得名，指通用化学式为  $ABX_3$  的一类材料。在  $ABX_3$  晶体中， $BX_6$  构成正八面体， $BX_6$  之间通过共用顶点 X 连接，构成三维骨架，A 嵌入八面体间隙中使晶体结构得以稳定。其中 A 为大半径的一价阳离子（如甲胺阳离子  $MA^+$ 、甲脒阳离子  $FA^+$ 、铯离子  $Cs^+$  等），B 为小半径的二价阳离子（如亚铅离子  $Pb^{2+}$ 、亚锡离子  $Sn^{2+}$ 、亚锗离子  $Ge^{2+}$  等），X 通常为卤素阴离子（如氟离子  $F^-$ 、氯离子  $Cl^-$ 、溴离子  $Br^-$ 、碘离子  $I^-$  等）。常见的钙钛矿材料主要有  $FAPbI_3$ 、 $MAPbI_3$  等。

图表 2 典型的钙钛矿材料晶格结构



资料来源：李春静等《钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池的研究进展》

钙钛矿具有轻质、柔性、弱光性高等特点，下游应用场景广阔。(1) 光伏建筑一体化 (BIPV)，钙钛矿可以做到自然半透，同时颜色可调，因此既可以作为发电幕墙，也可以用于发电石材。(2) 车顶光伏，汽车对面积及重量相对敏感，轻质的钙钛矿组件是理想的材料之一。(3) 移动设备和电子产品，钙钛矿低温即可制备，可制成柔性器件，应用于可穿戴电子产品的移动电源。(4) 联网传感器，钙钛矿的弱光发电性能好，可以在室内弱光条件下为物联网传感器提供可靠稳定的电力来源，让物联网更加轻量化也更可靠。(5) 大型地面电站及分布式光伏，钙钛矿理论转换效率高，且可以与晶硅电池叠层实现更高转换效率，未来在光伏电站场景具有较大发展潜力。

图表 3 钙钛矿电池应用场景更为广阔

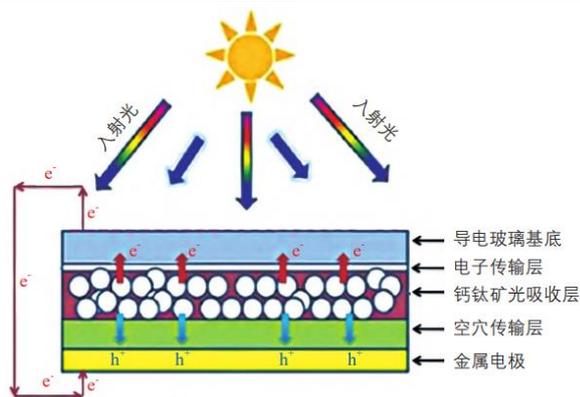


资料来源：仁烁光学官方公众号，极电光能官方公众号，华创证券整理

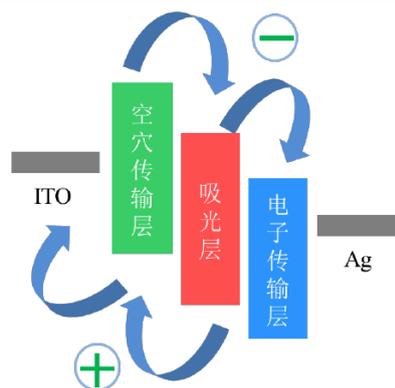
(二) 工作原理与晶硅电池类似，材料体系灵活可设计性强

钙钛矿太阳能电池通常由导电基底（ITO/FTO）、电子传输层（ETL）、钙钛矿光吸收层、空穴传输层（HTL）以及金属电极组成。当太阳光入射到电池表面时，钙钛矿材料吸收太阳光，能量大于吸收层材料禁带宽度的光子被其吸收，钙钛矿材料内部的电子由基态转变为激发态，在材料内部形成光生空穴和光生电子，光生电子被电子传输层吸收传至阴极，进入外电路，而光生空穴被传输至阳极，再进入外电路与光生电子汇合，形成闭合回路产生电流。

图表 4 钙钛矿太阳能电池的基本结构



图表 5 钙钛矿太阳能电池的工作原理

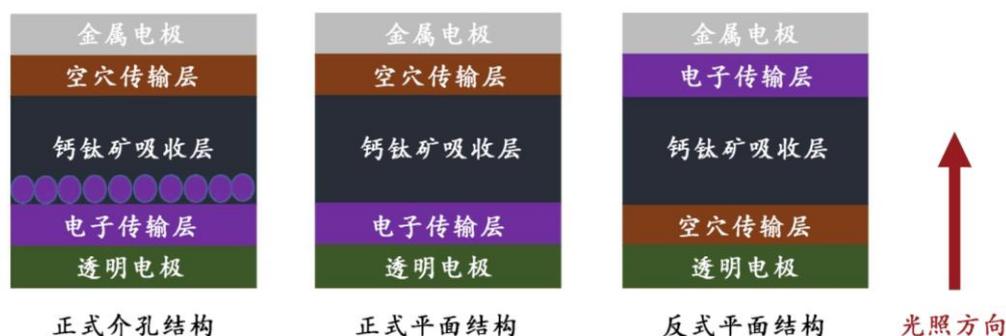


资料来源：张敏等《钙钛矿光伏技术的研究进展与产业化趋势》

资料来源：孔文池《高质量钙钛矿薄膜的合成、加工及应用研究》

常见的钙钛矿太阳能电池有正式介孔结构、正式平面结构、反式平面结构。按照电荷的传输方向钙钛矿太阳能电池可以分为 n-i-p 结构（正式结构）和 p-i-n 结构（反式结构），按照传输层的结构不同可以分为介孔结构和平面结构。正式介孔结构的电子传输层材料需要高温烧结，耗能较高的同时也在一定程度上限制了其柔性基底的选择。相较于介孔结构，平面结构具有制备工艺简单、开路电压更高等优势，更适用于柔性电池、叠层电池和大面积电池的发展。一般情况下，采用正式结构通常具有更高的转换效率，采用反式结构则表现出更优秀的长期稳定性。

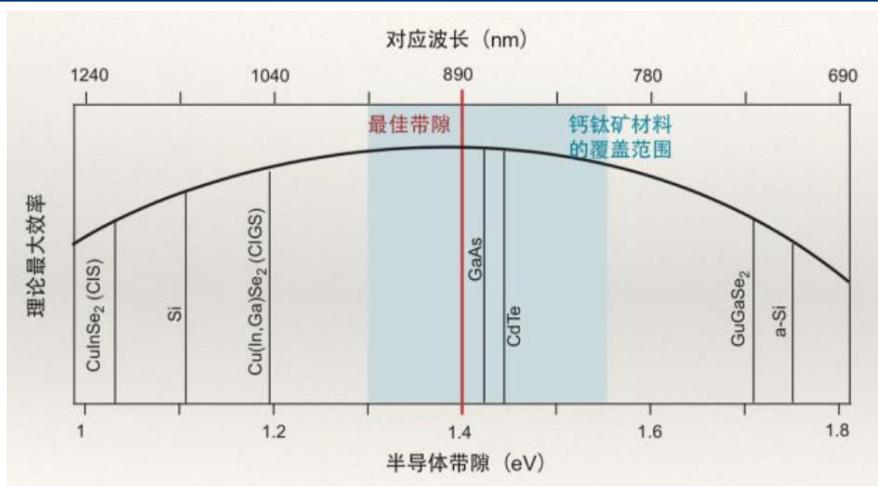
图表 6 钙钛矿电池结构通常有正式介孔结构、正式平面结构、反式平面结构



资料来源：孙晓煦《电子传输层界面优化提高钙钛矿太阳能电池光伏性能》，华创证券

钙钛矿电池材料体系灵活，具有可设计性。每种太阳能电池的活性层材料不同，对应的带隙不同，对太阳光谱的响应范围存在差异，如晶硅的带隙约 1.12eV，砷化镓 (GaAs) 的带隙约 1.42eV，钙钛矿材料 MAPbI<sub>3</sub> 的带隙约为 1.55eV。钙钛矿电池吸收层中 A、B、X 元素的配比可以灵活调整，可对应调整钙钛矿材料的带隙，寻找与最佳带隙契合且稳定的钙钛矿材料仍然是未来研发的重点方向之一。钙钛矿材料的可设计性为优化光电转换效率、提高稳定性和适应不同应用场景提供了广泛的空间。

图表 7 通过调整钙钛矿材料带隙可优化转换效率



资料来源：索比光伏网

除钙钛矿吸收层的材料可设计外，电子传输层、空穴传输层、电极层和导电层材料同样有较多选择。

(1) **导电层**：基材一般为柔性材料、玻璃等，并通过物理或化学镀膜方法均匀的镀一层导电氧化物。如 ITO 导电玻璃表面镀层是氧化铟锡，FTO 导电玻璃表面镀层是氟掺杂氧化锡。

(2) **电子传输层 (ETL)**：常见材料有金属氧化物和有机材料，如 TiO<sub>2</sub>、ZnO、SnO<sub>2</sub>、富勒烯 C60 及其衍生物 PC61BM、茚酰亚胺 (PDI)s 类和萘酰亚胺类 (NDIs) 等。高质量的富勒烯及其衍生物薄膜可以在低温溶液中制备；茚酰亚胺类材料合成价格相对便宜；金属氧化物材料可以通过低温工艺制备，过程简单且易于大规模制备。

(3) **钙钛矿吸光层**：基础材料为钙钛矿前驱液，由碱金属卤化物钙钛矿和有机金属卤化物钙钛矿组成。如有机金属三卤化物 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbX<sub>3</sub> (其中 X=Cl\Br\I)，其中 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> (碘甲胺) 最为常见。制作金属卤化物钙钛矿所需的原材料储量丰富，成本低廉，配置前驱液的工艺相对简单，对溶液纯度以及后续加工环境没有过高的要求。

(4) **空穴传输层 (HTL)**：空穴传输层材料分为三类，导电聚合物、有机小分子材料和无机半导体材料。较为经典的有机空穴传输材料为 spiro-OMeTAD 及其改性材料。常见的聚合物材料有 PEDOT:PSS，具有高热稳定性、良好的加工性和机械柔韧性、透光率高的特性。常见的无机半导体材料有 CuI、CuSCN 等，无机空穴传输材料，合成简单，成本较低。

(5) **电极层**：一般使用银、铜等金属电极，或金属氧化物等作为电极层材料。

图表 8 钙钛矿太阳能电池原材料大多为基础化工材料

电池结构	材料类型	代表材料
电极层	贵金属	银、铜
	导电玻璃	ITO、FTO
空穴传输层	导电聚合材料	PEDOT:PSS、聚[双(4-苯基)(2,4,6-三甲苯基)胺](PTAA)、共轭聚电解质(CPE)、聚合电解质等
	有机材料	spiro-OMeTAD、TPASB、DFH、MPA-BTTI、NPB
	无机材料	碘化亚铜(CuI)、硫氰酸亚铜(CuSCN)、氧化镍(NiOX)、铜基材料(CuX)等
钙钛矿吸光层	有机-无机杂化	MAPbI <sub>3</sub> -PEA <sub>2</sub> Pb <sub>2</sub> I <sub>4</sub> 、MAPbI <sub>3</sub> -3BBAPbI <sub>3</sub> 、MAPbI <sub>3</sub> -FPEA <sub>2</sub> MA <sub>3</sub> Pb <sub>4</sub> I <sub>13</sub> 、MAPbI <sub>3</sub> -PEIPbI <sub>3</sub> 、(FASnI <sub>3</sub> ) <sub>0.6</sub> (MAPbI <sub>3</sub> ) <sub>0.4</sub>
	全无机	CsPbBr <sub>3</sub> 、CsPb <sub>x</sub> Br <sub>3-x</sub> 、KPbI <sub>3</sub> 等
电子传输层	有机材料	富勒烯及其衍生物、茚二酰亚胺、萘二酰亚胺、氮杂苯基分子以及 n 型聚合物
	新型小分子材料	TPE-PDI <sub>4</sub> 、TDTP 等
	无机材料	二氧化钛(TiO <sub>2</sub> )、氧化铟(In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )、五氧化二铌(Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )、氧化铜(ZnO)、氧化锡(SnO <sub>2</sub> )

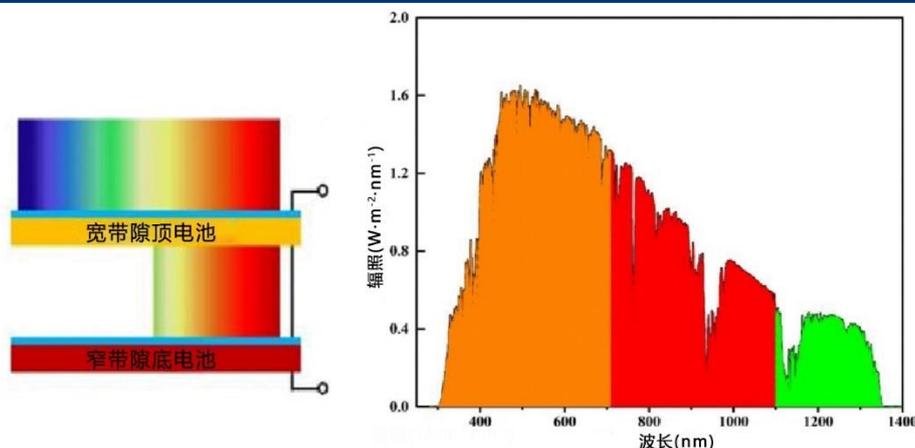
资料来源：《有机电子传输材料在反式钙钛矿太阳能电池中的研究现状》王耀武、王彬彬，《全钙钛矿叠层太阳能电池的制备及优化》鲁迪，《基于界面维度调控的高效反式钙钛矿太阳能电池》杨喆淇，华创证券整理

### (三) 叠层电池光谱响应范围更宽，进一步打开转换效率的天花板

**单结钙钛矿电池最大理论转换效率为 33%**。钙钛矿材料带隙根据组分的不同可在一定范围内调节，理论极限效率可达 33%，接近单结电池理论转换效率极限 33.7%（对应理想带隙 1.34eV），高于晶硅的理论极限 29.4%。

**多结电池组成的叠层电池可以进一步提升转换效率**。以双结电池为例，通常选择宽带隙的材料作为顶电池，窄带隙材料为底电池。当太阳光垂直照射在叠层器件上，宽带隙顶电池吸收能量高于带隙的高能光子，对应图表 9 中橙色区域的光谱范围；低于顶电池带隙的低能量光子不被吸收，透过顶电池到达底电池表面被吸收，对应图表 9 中红色区域的光谱范围，底电池拓宽了整个器件的光谱吸收范围。叠层电池光谱响应范围更宽，拥有更高的转换效率，双结、三结电池的理论转换效率分别可以达到 45%、49%。

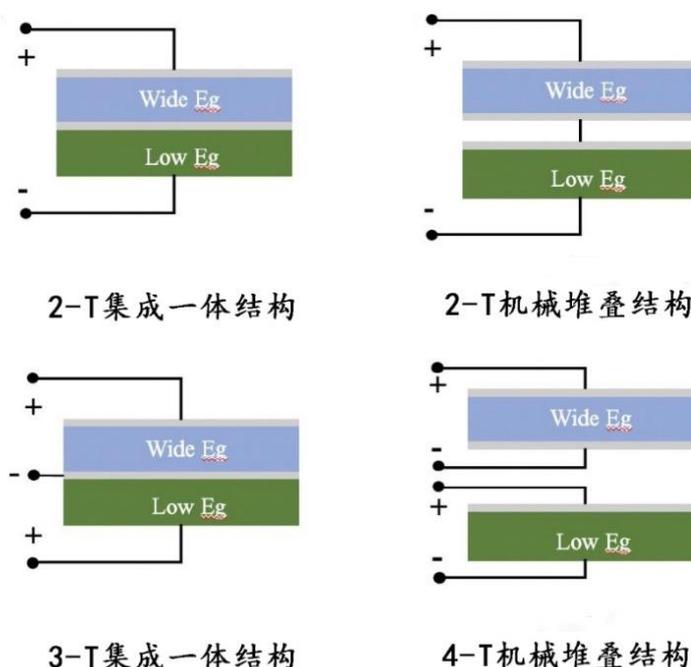
图表 9 叠层电池光谱响应范围更宽



资料来源：江璐冰《高效半透明钙钛矿太阳能电池的制备及其在四端叠层太阳能电池中的应用》

两端（2-T）集成一体以及四端（4-T）机械堆叠是目前关注度较高的两类叠层结构。双结叠层电池按连接方式可分为两端(2-T)叠层、三端(3-T)叠层和四端(4-T)叠层结构，按堆叠方式可分为集成一体结构和机械堆叠结构。其中四端（4-T）机械堆叠结构引入了两个完整的子电池，简单机械堆叠上下并联，各有两个电极，电路相互独立，整体一共四个电极；但由于器件整体功能层较多，会产生多种吸光损失。两端（2-T）集成一体结构是在电池制作时通过中间复合层或隧穿层实现叠层串联，形成一个完整的电池，整体一共两个电极，可以极大地降低非活性层的寄生吸收，提高器件的光子利用率，具有较高的效率潜力；但由于晶硅是绒面，在绒面上难以镀膜，两端叠层生产难度较大。

图表 10 按堆叠和电极连接方式不同双结叠层电池通常可分为四类



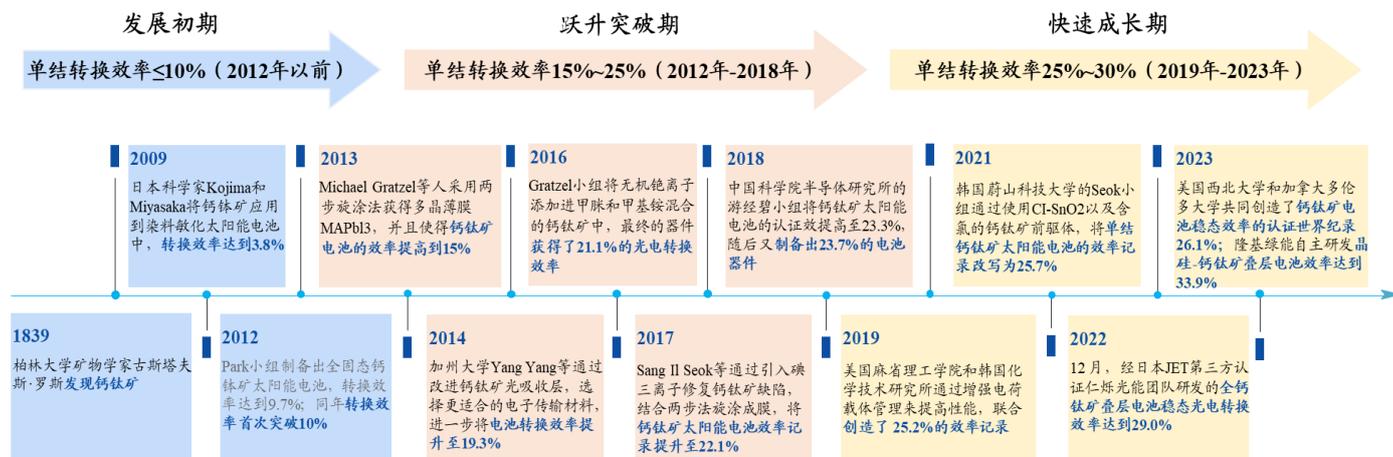
资料来源：江璐冰《高效半透明钙钛矿太阳能电池的制备及其在四端叠层太阳能电池中的应用》

#### （四）钙钛矿电池目前正处于快速成长期，转换效率不断突破

第一块钙钛矿太阳能电池器件于 2009 年问世，历经多年发展转换效率迅速跃升。2009 年，日本科学家 Kojima 和 Miyasaka 将钙钛矿这种材料应用到染料敏化太阳能电池中，实现了 3.8% 的光电转换效率，制备出全球第一个具有光电转换效率的钙钛矿太阳能电池器件。此后，钙钛矿电池迅速发展，转换效率不断突破跃升，2012 年-2018 年，仅六年左右时间钙钛矿电池效率提升超过 10pct。

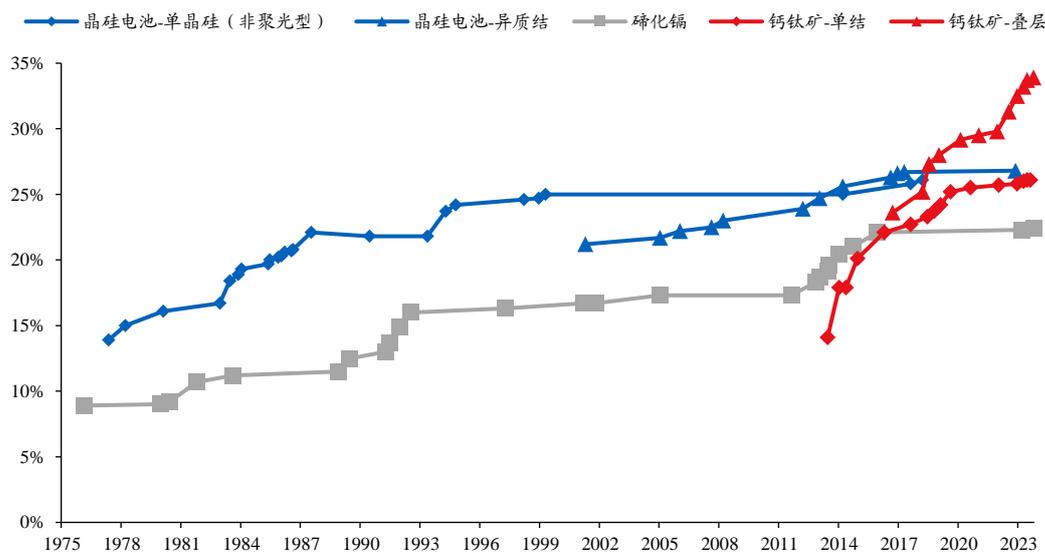
目前，钙钛矿正处于快速成长期，电池效率仍不断被刷新。据 NREL 效率纪录，单结钙钛矿电池方面，2023 年 7 月，美国西北大学和加拿大多伦多大学共同创造了钙钛矿电池稳态效率的认证世界纪录 26.1%。叠层钙钛矿电池方面，2023 年 11 月，隆基绿能自主研发晶硅-钙钛矿叠层电池效率达到 33.9%，是目前全球晶硅-钙钛矿叠层电池效率的最高纪录。

图表 11 钙钛矿太阳能电池发展迅速



资料来源：前瞻产业研究院，NREL，华创证券整理

图表 12 钙钛矿太阳能电池转换效率快速追赶晶硅电池



资料来源：NREL，华创证券 (截至2023年12月)

## 二、钙钛矿制备工艺暂未标准化，镀膜及涂布为核心设备

钙钛矿生产的工艺流程主要包括薄膜制备、激光刻蚀、封装等步骤。以协鑫光电的单结钙钛矿组件生产流程为例，包含导电玻璃清洗、P1激光划刻、沉积空穴传输层、沉积钙钛矿层、沉积电子传输层、P2激光划刻、沉积背电极、P3激光划刻、P4激光清边、检测分拣和封装等步骤。

钙钛矿生产过程中涉及的设备主要有镀膜设备、涂布设备、激光设备、封装设备等四大类。镀膜设备包括PVD（磁控溅射、蒸镀等物理气相沉积）、RPD（等离子沉积）、ALD（原子层沉积）、CVD（化学气相沉积）等；涂布设备包括狭缝涂布、刮刀涂布等；激光设备包括刻蚀、切割、清边等。

其中镀膜设备主要用于制备空穴传输层、电子传输层、背电极；涂布设备主要用于制备钙钛矿吸收层；激光设备主要用于激光划线，阻断导通，以形成电池的串联结构。

图表 13 钙钛矿制备工艺及所用设备暂未标准化

组件结构	生产流程/工艺	
透明电极TCO (ITO或FTO)	磁控溅射/CVD	①
空穴传输层HTL	磁控溅射/蒸镀/涂布	② → ③ 激光P1
钙钛矿光敏层	狭缝涂布/蒸镀	④
电子传输层	RPD/蒸镀/ALD	⑤ → ⑥ 激光P2
金属电极	磁控溅射/蒸镀	⑦ → ⑧ 激光P3
背板玻璃	封装	⑩ ← ⑨ 激光P4

资料来源：全球光伏转引协鑫光电，立鼎产业研究院，华创证券整理（注：以反式结构为例，其中深蓝色为目前主流工艺）

（一）钙钛矿层制备的主流工艺为狭缝涂布，蒸镀发展潜力大

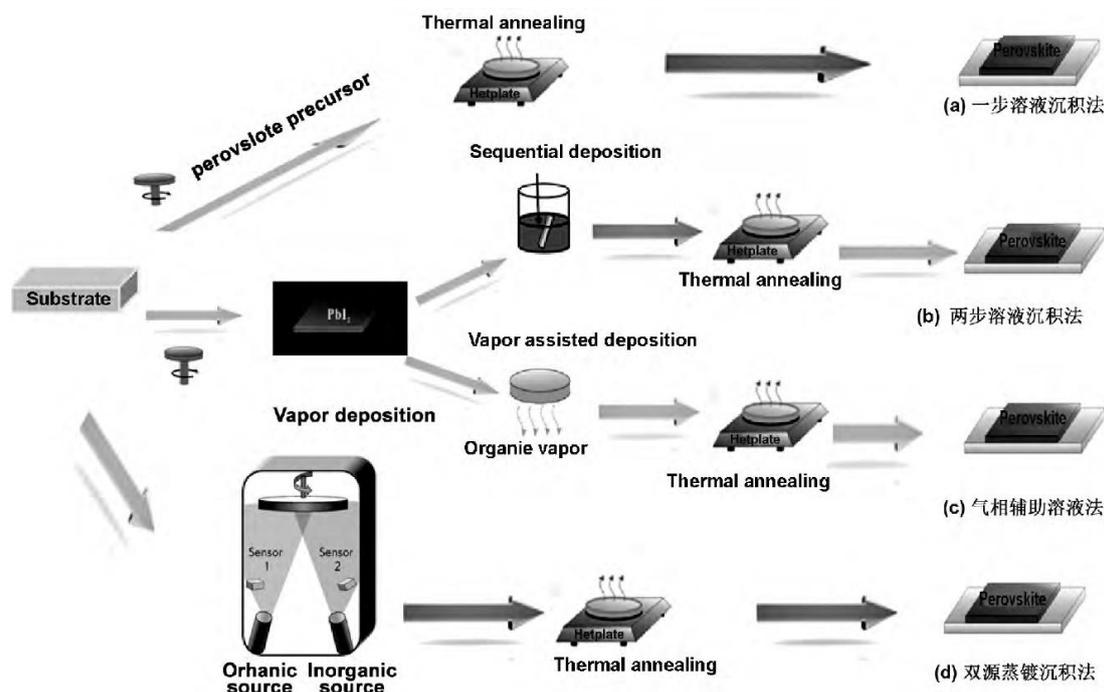
钙钛矿电池最重要的部分是钙钛矿吸收层，其成膜质量直接决定了钙钛矿电池的性能。目前，钙钛矿层制备方法主要包括一步溶液沉积法（湿法）、两步溶液沉积法（湿法）、气相溶液辅助沉积（干湿法结合）和双源气相沉积（干法）等。干法与湿法工艺各有优劣势，从目前的产业实践来看，湿法工艺的经济性更好，干法工艺可以获得质量更高的钙钛矿层，各企业在质量与经济性之间权衡，最终方案暂未定型。

图表 14 不同的钙钛矿薄膜制备方法及其优、缺点

制备方法	具体操作	优点	缺点
一步溶液沉积法	首先将卤化物与金属卤化物或氯化铅(PbCl <sub>2</sub> )混合，将混合后的溶液溶解在有机溶剂中，通过加热搅拌加速溶液溶解，形成前驱体；然后将前驱体滴在准备好的衬底上，使用匀胶机提高衬底的旋涂速度至某一定值，维持一定的时间进行溶剂蒸发，并通过退火工艺除去剩余的有机溶剂，达到钙钛矿结晶的目的	操作简单、成本低廉	钙钛矿薄膜的结晶度较难控制，且难以大规模生产
两步溶液沉积法	按照一定的转速将溶有卤化铅的有机溶液旋涂在带有电子传输层的导电玻璃基底上；为进一步促进卤化铅薄膜结晶，对旋涂完毕的卤化铅薄膜进行加热处理，然后将溶解有有机铵卤化物的溶液旋涂在卤化铅薄膜上	溶液不易偏析，成膜相比一步法质量提高	转化过程属于不同材料之间的异相反应，容易造成转化时间过长、薄膜内部卤化铅无法完全转化等问题
气相溶液辅助沉积	通过旋涂方法把 PbI <sub>2</sub> 沉积到基底上，然后将基底转入到氮气环境中，且在 150°C 的温度下将 MAI 粉末气化使得与 PbI <sub>2</sub> 反应，退火 2h 之后，最终形成 MAPbI <sub>3</sub> 多晶薄膜	薄膜无针孔、晶粒尺寸可达到微米	接近基片的 PbI <sub>2</sub> 可能反应不完全，影响串联性能
双源气相沉积	将有机胺卤化物及卤化铅分别放在坩埚中，带有电子传输层的导电玻璃基底放在压强低于 10-4Pa 的蒸发室内，通过调控沉积时间、电流等工艺参数来控制薄膜的形貌及成分均匀性	薄膜的形貌和成分均匀	需要高真空环境，设备成本高，工艺较复杂

资料来源：张敏等《钙钛矿光伏技术的研究进展与产业化趋势》，孔文池《高质量钙钛矿薄膜的合成、加工及应用研究》，华创证券整理

图表 15 钙钛矿层制备工艺示意图



资料来源：张林星《一步溶液法制备有机金属卤化物钙钛矿薄膜的研究进展》

**两步溶液沉积法性价比更高，从设备工艺来看，狭缝涂布是目前产业主流。**溶液法制备钙钛矿薄膜操作简单，可以实现较好的涂布成膜效果，应用前景广阔；其中两步法相较于一步法制备的钙钛矿层在表面形貌和平整度方面均有改善，性价比更高。按设备工艺分类，主要有刮刀涂布、狭缝涂布、丝网印刷、喷涂、喷墨打印法等。

**(1) 刮刀涂布：**刮刀涂布法是利用刮刀将钙钛矿前驱体溶液分散到基底上，所制备钙钛矿薄膜的厚度由前驱体溶液浓度、刮板与基底缝隙宽度和刮涂的速度决定。

**(2) 狭缝涂布：**可以通过控制系统进行狭缝宽度、移动速度和输液速度的调整，对薄膜质量进行更精细化调控，涂布头在制备过程中与基底无直接接触，可以避免由于基底平整度不好而导致直接刮蹭。此外，狭缝涂布法可以将溶液密封在储液罐中，提高溶液利用率的同时，也能保证溶液浓度的统一和减少对操作人员的影响。

**(3) 丝网印刷：**丝网印刷法是通过丝网的数目和厚度调整制备薄膜的厚度，对丝网制备要求较高。

**(4) 喷涂及喷墨打印：**通过在喷头内部施加压力的方法将钙钛矿前驱体溶液从喷头内挤出并在基底上成膜的技术。喷涂法中常用的喷头有高压气喷头和超声喷头等。与喷涂法不同，喷墨打印法利用喷头内部压电材料形变将溶液挤出，按照预设程序进行相对运动，可以按要求制备不同图案，避免了制版的过程，提高了钙钛矿原料的利用率。

**真空蒸镀成膜质量高，更适用于叠层电池，未来发展潜力大。**也有部分厂商采用蒸镀的方式制作钙钛矿层，由于工艺较为复杂，目前设备较为昂贵，材料利用率相较溶液法更低。但蒸镀法制备的钙钛矿层表面覆盖率高，成膜质量更好，更适用于叠层电池。随着蒸镀工艺的成熟以及降本持续推进，一步共蒸技术有望成为未来主流。

图表 16 大面积钙钛矿薄膜制备技术对比

制备方法	优点	缺点	流程示意图
刮刀涂布法	易于大面积制备，无需复杂设备	溶液利用率低，敞开环境下溶液均一性差	
狭缝涂布法	易于大面积制备，成产效率较高	对设备精确度要求较高	
丝网印刷法	易于大面积制备，涂覆过程简单	溶液利用率低，对丝网精度要求较高	
喷涂法	易于大面积制备，喷涂过程简单	溶液利用率低，可重复性较差	
喷墨打印法	材料利用率高，实现定制化生产	设备要求高，生产效率低，难以控制结晶过程	
气相沉积法	薄膜质量较高，可精准调控	生产效率低，成本高	

资料来源：金胜利等《钙钛矿太阳能电池稳定性研究进展及模组产业化趋势》，华创证券整理

## （二）电荷传输层以及电极层的制备通常采用 PVD 工艺

**PVD（物理气相沉积）**是电荷传输层以及电极层的制备的主流工艺。PVD 主要是指在真空条件下，采用物理方法将材料源（固体或液体）表面气化成气态原子或分子，或部分电离成离子，并通过低压气体（或等离子体）过程，在基体表面沉积具有某种特殊功能的薄膜的技术，物理气相沉积是主要的表面处理技术之一。

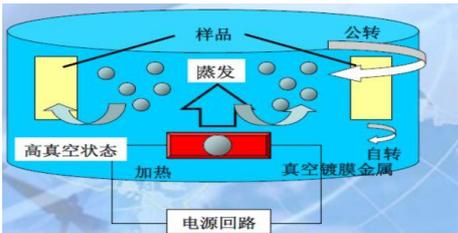
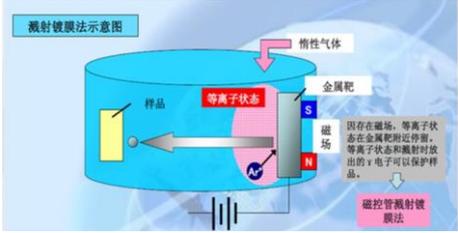
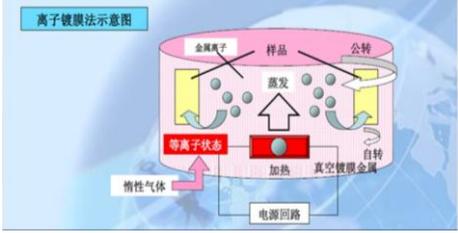
**PVD 镀膜技术按制程工艺主要分为三类，真空蒸发镀膜、真空溅射镀膜和真空离子镀膜。**

**（1）蒸镀**是较早开发的并应用的 PVD 技术，成熟度较高。蒸镀主要是指在真空室内通过加热靶材，并使其蒸发形成蒸汽流，而镀件的表面温度较低，靶材在镀件表面凝固形成薄膜。在原理和工艺上都相对简单。但由于靶材对镀件几乎没有冲击，薄膜附着力较差，一般适用于低熔点的材料镀膜。

**（2）溅射制备的薄膜附着力较强，其中磁控溅射应用最为广泛。**溅射指真空环境下，利用高能粒子轰击靶材，使靶材表面的原子获得能量而逃逸的过程。被溅射的靶材沉积到基材表面称为溅射镀膜，其中磁控溅射的应用最为广泛。相比于蒸镀，磁控溅射具有材料覆盖彻底、附着力强等优点，但磁控溅射靶材利用率相对较低，离子能量较高可能会对基层造成损伤。

(3) **离子镀的成膜质量高、对基底的损伤较小。**离子镀指在真空条件下，利用气体放电使气体或被蒸发物质部分电离，并在气体离子或被蒸发物质离子的轰击下，将蒸发物质或其反应物沉积在基片上的方法。其中反应式等离子镀（RPD）可用于钙钛矿电子传输层和金属氧化物电极层的制备。RPD 工艺过程更为温和，降低了对衬底轰击造成的损伤，但其生产效率和靶材利用率较低，限制了 RPD 大规模普及。且 RPD 设备核心部件依赖进口，且专利受日本住友限制，国内仅捷佳伟创获授权可以生产相关 RPD 设备。

图表 17 物理气相沉积（PVD）的主要工艺对比

方法	优点	缺点	示意图
真空蒸镀	工艺简便，纯度高，通过掩膜易于形成所需要的图形	蒸镀化合物时由于热分解现象难以控制组分比，低蒸汽压物质难以成膜	
溅射镀膜	附着性能好，易于保持化合物、合金的组分比	需要溅射靶，靶材需要精制，而且利用率低，不便于采用掩膜沉积	
离子镀	附着性能好，化合物、合金、非金属均可成膜	装置及操作均较复杂，不便于采用掩膜沉积	

资料来源：PVD 镀膜公众号，华创证券

根据所使用的材料不同，空穴传输层、电子传输层、透明导电层、金属电极存在多种不同工艺路径，一般使用 PVD 或 RPD 镀膜设备。

(1) **空穴传输层：**目前主流使用磁控溅射 PVD 工艺制备，也有部分厂商选择蒸镀或涂布工艺。

(2) **电子传输层：**目前主流使用反应式等离子镀 RPD 工艺制备，其本质也是 PVD 的一种，也有部分厂商选择蒸镀或 ALD 工艺。一般不使用磁控溅射 PVD 的主要原因是，目前产业化的钙钛矿电池以 p-i-n 反式结构为主，高能粒子轰击时可能会对下面的钙钛矿层造成损伤。

(3) **透明导电层（顶电极）：**目前主流采用磁控溅射 PVD 工艺制备，也有部分厂商使用 CVD 制备，将 ITO 或 FTO 沉积在玻璃衬底上，进而形成导电玻璃。目前一般使用 ITO（氧化铟锡），FTO（氟掺杂氧化锡）导电性稍差，但经济性更高。

(4) **金属电极（背电极）：**目前主流使用磁控溅射或蒸镀等 PVD 工艺制备，工艺相对比较成熟。产业化生产一般使用 TCO 材料，实验室为了提高电池转换效率，一般使用金、银等贵金属。

### （三）钙钛矿电池通常需要四道激光工序，对精度要求高

激光工序涉及整个钙钛矿电池的制备过程，主要用于刻蚀和清边。在钙钛矿电池各层薄膜的制备工序之间，通常需要穿插刻蚀划线工序，以形成电池的串联结构。划线可以通过化学腐蚀法、光刻掩膜法、机械划线法和激光划线法等实现。激光划线由于可以产生更细的线槽，更小的损伤，已逐渐取代其它的方法成为目前主要的划线手段。激光工序的精度会直接影响各层薄膜的损伤缺陷和切面平整程度，进而影响电池的寿命和转换效率，因此高精度的激光设备在钙钛矿电池生产过程中不可或缺。

刻蚀可以阻断导通，并形成单独的模块，以实现钙钛矿电池的分片；清边主要实现电池边缘的绝缘处理。在 P1-P3 的刻蚀环节，激光主要起到切割作用，可以使材料表面快速加热到汽化形成槽线，阻断电路导通，以实现电池分片串联。P4 将边缘清理干净后便于后续的封装工序

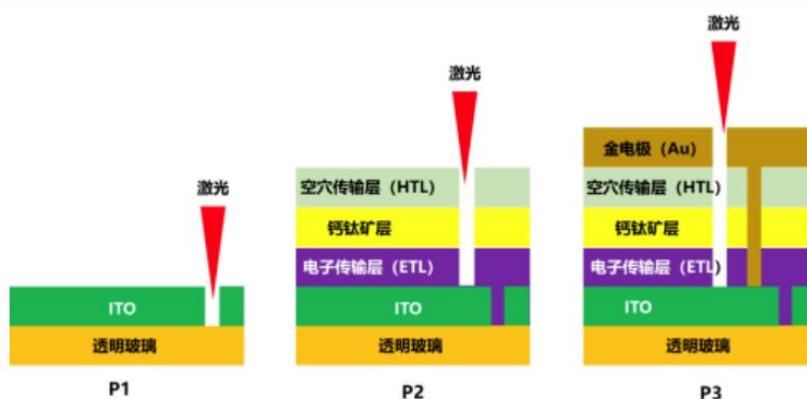
**（1）P1 激光刻蚀：**该工序在透明导电电极 TCO 沉积后，主要实现 TCO 层的刻蚀，同时不伤及透明玻璃，形成相互独立的 TCO 衬底。

**（2）P2 激光刻蚀：**依次制作电子传输层、钙钛矿层和空穴传输层之后，用激光刻蚀上述三层，暴露出 TCO 层，形成一道线槽。下一步进行金属电极沉积时，金属会填满这道线槽，从而实现子电池之间的正负极相互连接。

**（3）P3 激光刻蚀：**该工序在金属电极沉积后，划开金属电极/空穴传输层/钙钛矿层/电子传输层，而不伤及 TCO 层，从而实现相邻电池的分离。该工序对激光划线的精细控制能力要求较高。

**（4）P4 激光清边：**利用激光清除电池边缘的沉积膜，对边缘区域做绝缘处理。

图表 18 钙钛矿太阳能电池制备过程中的 P1-P3 激光刻蚀



资料来源：纳飞晓峰公众号

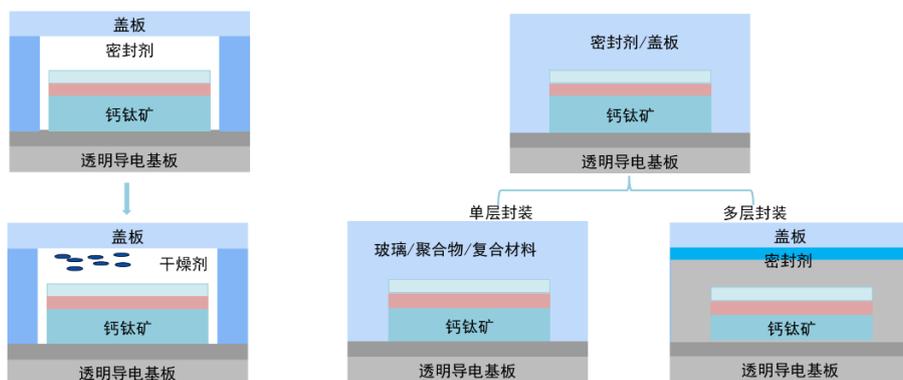
### （四）封装阻隔性能要求高，可对标 OLED 封装

钙钛矿电池对水汽高度敏感，阻隔性能要求接近 OLED 显示封装。晶硅电池对水汽透过率要求在  $10^{-1}g/(m^2 \cdot d)$  水平，而钙钛矿则要求接近  $10^{-5}g/(m^2 \cdot d)$ ，钙钛矿电池封装的阻隔性能要求高出晶硅电池几个量级，接近柔性 OLED 显示的封装要求。

常见的钙钛矿组件封装方式一般分为间隙封装结构和无间隙封装结构。（1）间隙封装结构：采用覆盖层（例如玻璃、聚合物板）和边缘密封，以避免氧气和水分从侧面渗透。覆盖层和 PSC 之间没有封装胶可以大大减少偶然的降解。为了进一步增强 PSC 对潮湿的长

期稳定性，可以在边缘放置干燥剂，以吸收可能渗透到装置中的水蒸气。（2）**无间隙封装结构**：封装胶始终粘在光伏器件上，光伏器件与封装材料之间没有间隙，以抑制钙钛矿组件的挥发，保护效果更好，但对封装材料的透光性能要求高。无间隙封装可分为单层封装和多层封装两种类型，与多层封装相比，单层封装在制造和与太阳能电池集成方面更为简单。

图表 19 钙钛矿电池常见的封装方式



资料来源：Qian-Qian Chu, et al. 'Encapsulation: The path to commercialization of stable perovskite solar cells'

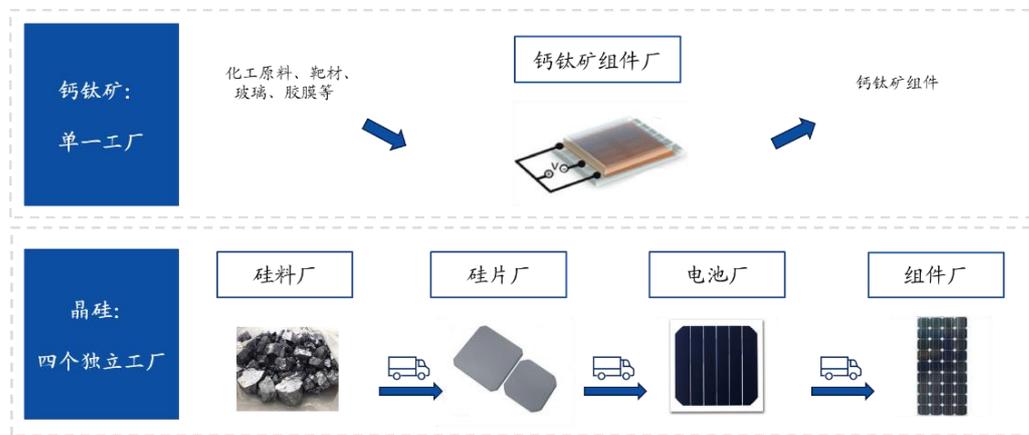
### 三、钙钛矿电池产业化潜力突出，大面积制备及稳定性仍需突破

#### （一）高生产效率和低能耗的优势奠定钙钛矿产业化基础

##### 1、制造链条相较于晶硅显著缩短，生产效率明显提升

钙钛矿组件在单一工厂即可实现生产，相较于晶硅生产链条显著缩短。晶硅电池生产通常需要经过硅料、硅片、电池、组件等多个工厂，若不考虑不同工厂间的运输过程，从硅料到组件完工需要约 3 天时间。相较于晶硅组件，钙钛矿组件的生产流程大幅缩短，玻璃、胶膜、靶材和化工原料等原材料通过单一工厂流水线即可完成生产制造，组件成型只需要约 45 分钟时间。

图表 20 相较于晶硅组件钙钛矿组件生产链条显著缩短

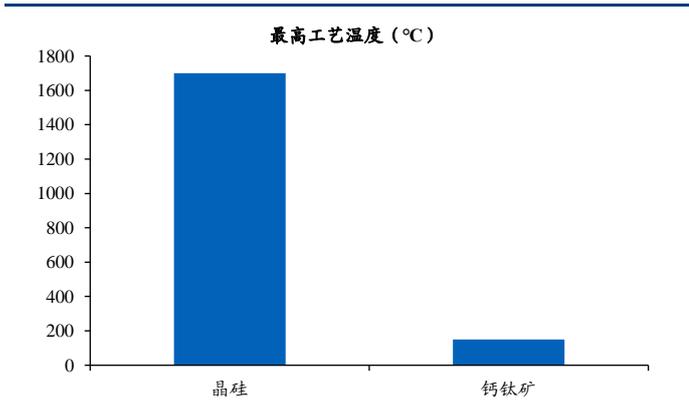


资料来源：阿尔法工厂，Michael Wong-Stringer, et al. 'High-Performance Multilayer Encapsulation for Perovskite Photovoltaics'，华创证券整理

## 2、工艺温度不超过 150°C，生产过程中能耗较少

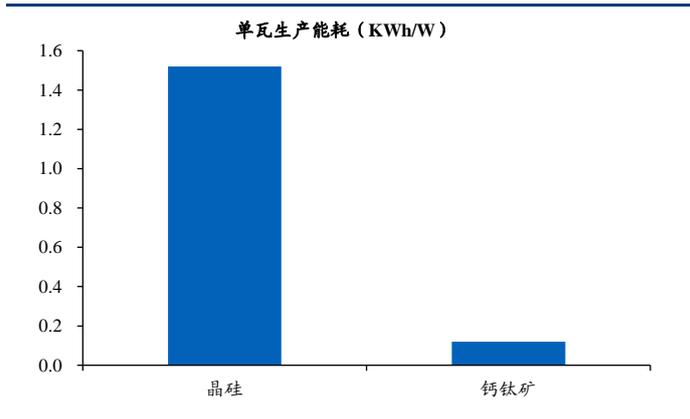
钙钛矿制备条件温和，可有效降低生产能耗。通常情况下，钙钛矿组件的各功能层可通过温和条件制备，通过涂布、物理气相沉积等工艺即可实现成膜，整个生产过程温度不超过 150°C，而晶硅材料制备时，拉晶的工艺温度 1700°C 极大降低了生产能耗。据协鑫光电，制造 1 瓦单晶组件的能耗大约为 1.52KWh，而每瓦钙钛矿组件的生产能耗仅为 0.12KWh，单瓦能耗仅占晶硅的 1/10。

图表 21 钙钛矿组件最高工艺温度不超过 150°C



资料来源：能镜公众号，协鑫光电，华创证券

图表 22 钙钛矿组件单瓦生产能耗约 0.12KWh/W



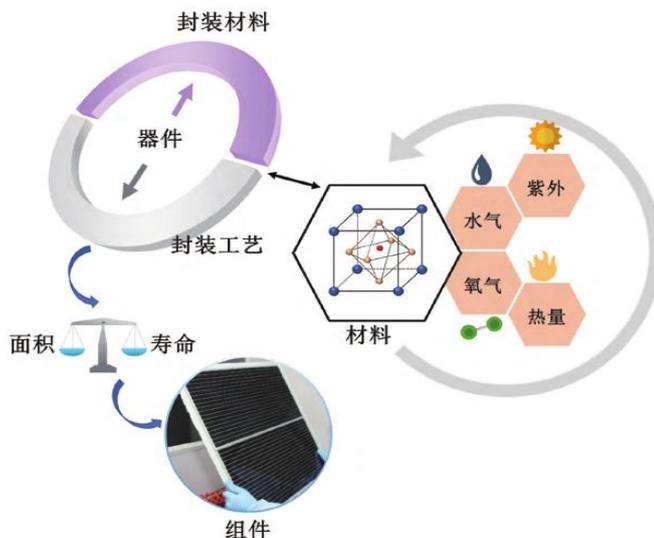
资料来源：能镜公众号，协鑫光电，华创证券

## (二) 稳定性和大面积制备仍是钙钛矿电池产业化亟需解决的难题

### 1、钙钛矿材料存在长期稳定性问题，目前寿命相对较短

长期稳定一直是钙钛矿电池面临的主要问题，导致其理论寿命明显低于晶硅。稳定性表现在材料、器件和组件等环节，任何一个环节材料性能失效都会导致产品性能衰减。目前，钙钛矿电池的理论使用寿命约 5-15 年，明显低于晶硅组件的 25 年。

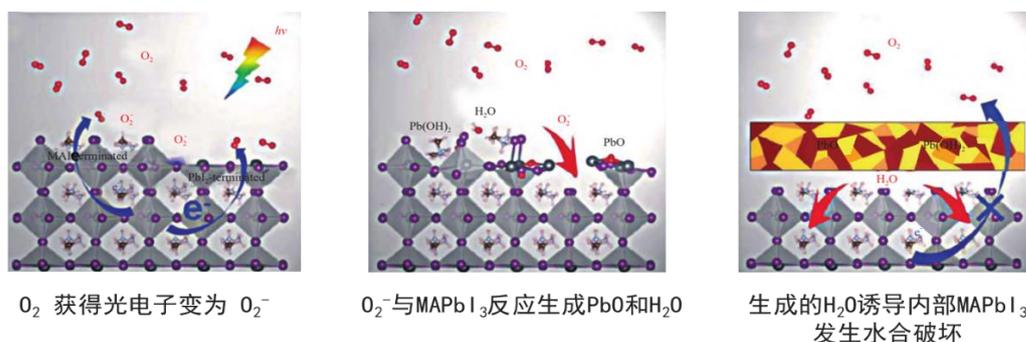
图表 23 钙钛矿太阳能电池稳定性的影响因素



资料来源：金胜利等《钙钛矿太阳能电池稳定性研究进展及模组产业化趋势》

钙钛矿材料稳定性较差，易发生分解。钙钛矿材料常使用在潮湿、高温、光照紫外线等因素的环境下，在此类环境中，材料稳定性较差，容易发生分解，导致材料内部结构发生变化，最终使钙钛矿太阳能电池的光电转换效率不断下降。以常见的钙钛矿材料碘化铅甲胺为例（MAPbI<sub>3</sub>），MAPbI<sub>3</sub> 在光和氧气作用下降解，氧化过程中产生的水与内部 MAPbI<sub>3</sub> 水合，导致钙钛矿材料降解，进而使得钙钛矿材料的晶体结构发生变化。

图表 24 典型钙钛矿材料 MAPbI<sub>3</sub> 在光和氧气作用下降解



资料来源：张敏等《钙钛矿光伏技术的研究进展与产业化趋势》

钙钛矿太阳能电池中，除了钙钛矿活性层之外，传输层和电极也是影响器件性能的关键因素。（1）**电子传输层**：正向结构钙钛矿太阳能电池中通常选择氧化钛、氧化锌和一些掺杂金属氧化物作为电子传输材料，在光照情况下氧化钛、氧化锌会产生光生空穴并催化分解钙钛矿材料。（2）**空穴传输层**：其材料对碘离子比较敏感，钙钛矿材料分解产生的碘离子会扩散进空穴传输材料中，降低其电荷传输性能。（3）**电极材料**：电极中的金属原子可以通过扩散作用进入到钙钛矿层中，使钙钛矿材料发生分解，而且光伏效应所形成的内建电场会加剧原子的扩散。同时，钙钛矿材料中的卤素离子也会扩散到金属电极，并造成电极材料的腐蚀，从而造成器件性能的衰减。

## 2、制备大面积钙钛矿电池存在效率损失，制造工艺要求高

商业化尺寸的钙钛矿电池转换效率明显低于实验室小尺寸钙钛矿电池。据 NREL，钙钛矿电池的实验室效率纪录均由较小尺寸电池（小于 1 cm<sup>2</sup>）创造，目前单结钙钛矿太阳能电池转换效率记录 26.1%，实现于 0.05cm<sup>2</sup> 的尺寸。从商业化尺寸单结钙钛矿组件效率来看，协鑫光电 1m×2m 钙钛矿组件转化效率达到 18.04%，极电光能 1.2m×0.6m 钙钛矿组件转化效率达到 18.2%。

相比其他类型的光伏电池，随着电池面积增大，钙钛矿电池转换效率下滑幅度更明显。由于钙钛矿材料的结晶时间很短，通常情况下工艺窗口期仅几秒钟，而制备大面积钙钛矿电池需要更长的涂布时间，结晶的均匀程度将难以控制。结晶过程中，若出现一个坏点都将影响整块电池的转换效率。因此钙钛矿层的涂布过程，对生产设备和工艺的稳定性提出了较高的要求。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/838037050034006031>