



# 钙钛矿行业深度：徐徐生羽翼，一化北溟鱼

## ——新能源技术趋势深度系列（四）

### 投资要点：

- **钙钛矿接力成为第三代电池技术，发展潜力巨大。**钙钛矿电池利用钙钛矿结构材料作为吸光材料，属于第三代高效薄膜电池。钙钛矿电池与组件呈现一体器件特征，制作工序一体化。前道电池制作主要是在玻璃基板上制作钙钛矿电池各功能层，并利用激光将电池片划分为若干子电池，形成串联结构；后道组件封装则是利用胶膜、TCO玻璃等将内部结构密封保护，并安装接线盒与外部电路连接的设备。钙钛矿电池所需的生产设备主要有镀膜设备、涂布设备、激光设备、封装设备四类，其中镀膜设备价值量占比最高。目前钙钛矿技术尚处于产业化初期阶段，技术路线未定型，多种路径并存。
- **钙钛矿具备理论转换效率高、理论成本低，应用场景广等优势。**转换效率：钙钛矿材料带隙根据组分的不同可在较大的范围内连续调节，单结钙钛矿电池理论转化效率可达33%，双结叠层钙钛矿电池可达45%。经济性：钙钛矿组件工艺流程简短，目前100MW中试线投资额为0.7-0.8亿元，达到量产成熟度后，单GW产能预计仅需5亿元投资额，约为晶硅电池投资额的一半，而钙钛矿组件成本预计为0.5-0.6元/W，约为晶硅组件极限成本的一半。应用场景：钙钛矿材料具有轻薄美观、颜色可调等优点，有望成为BIPV、CIPV等场景的首选。然而，钙钛矿技术在稳定性和大面积制备方面仍存在缺陷，各厂商从电池结构、材料体系、制备工艺、生产设备多维度出发探索解决方案，待难点解决有望迎来钙钛矿电池快速放量。
- **产业化进程提速，多家头部企业已启动GW级产线招标。**目前，商用尺寸钙钛矿组件效率已突破18%，产线以百兆瓦级为主，协鑫光电、纤纳光电和极电光能等3条百兆瓦以上钙钛矿产线已实现投产，极电光能、纤纳光电等多家厂商也已启动GW级产线建设计划，预计在2024-2025年搭建完成，产业化探索步伐持续加速。国内设备厂商积极布局钙钛矿技术，京山轻机、捷佳伟创、微导纳米等国内企业凭借深厚的技术积累率先布局镀膜设备，已陆续取得订单并实现出货；德沪涂膜、大正微纳等国内企业打破了国外对于涂布设备的垄断，正在持续加快国产化替代进程；帝尔激光、迈为股份、德龙激光、大族激光、杰普特等国内企业已实现激光设备量产销售，技术确定性较高。
- **钙钛矿技术逐步渗透，未来市场空间广阔。**光伏新增装机高速增长叠加钙钛矿电池渗透率提升，有望带动钙钛矿设备端和材料端市场规模的快速扩大。我们中性预计到2030年，全球钙钛矿设备新增市场空间将达322亿元，2023-2030年CAGR约为171%，对应的钙钛矿层/玻璃/封装材料/靶材/铝边框的市场空间分别达到27/284/54/236/41亿元。
- **投资建议：**从业绩放量顺序考虑，创新技术发展初期设备厂商最先收益，激光设备技术路径相对明确，涂布及镀膜设备技术路径未定，建议关注捷佳伟创、迈为股份、京山轻机、金辰股份、曼恩斯特、大族激光、帝尔激光、德龙激光、杰普特、德沪涂膜。其次关键辅材确定性较高，TCO玻璃端建议关注金晶科技、亚玛顿、耀皮玻璃，封装材料端建议关注福斯特、海优新材，靶材端建议关注隆华科技、阿石创。而从弹性角度来看电池厂商具备优势，重点标的包括钙钛矿创业公司协鑫光电、纤纳光电、仁烁光能、极电光能等。
- **风险提示：**钙钛矿技术进展不及预期，设备或辅材国产化不及预期，下游需求景气度变化。

## 正文目录

<b>1. 钙钛矿接力成为第三代电池技术.....</b>	<b>5</b>
1.1. 光伏电池技术发展.....	5
1.2. 钙钛矿电池原理.....	7
<b>2. 钙钛矿电池的优势与难题.....</b>	<b>8</b>
2.1. 钙钛矿电池的优势.....	8
2.1.1. 理论效率更高.....	8
2.1.2. 理论成本更低.....	10
2.1.3. 应用场景更广.....	12
2.2. 钙钛矿电池的产业化难题.....	13
2.2.1. 大面积制备效率降低.....	13
2.2.2. 稳定性较差.....	13
<b>3. 钙钛矿电池制作工艺.....</b>	<b>14</b>
3.1. 制备流程.....	14
3.2. 电极层.....	16
3.3. 空穴传输层.....	17
3.4. 电子传输层.....	18
3.5. 钙钛矿层.....	19
<b>4. 国内钙钛矿产业化进展梳理.....</b>	<b>21</b>
4.1. 钙钛矿制造端.....	21
4.2. 钙钛矿设备端.....	26
4.2.1. 镀膜设备：多条路线共同发展，RPD 潜力巨大.....	26
4.2.2. 涂布设备：国产化进程加速，德沪涂膜遥遥领先.....	30
4.2.3. 激光设备：参与多个生产流程，产业化进程较快.....	31
4.3. 钙钛矿辅材端.....	36
4.3.1. TCO 玻璃：生产门槛相对较高，国内厂商进展迅猛.....	36
4.3.2. 靶材：功能薄膜核心原料，国产化价值显现.....	37
<b>5. 市场空间测算.....</b>	<b>39</b>
5.1. 钙钛矿设备端空间测算.....	39
5.2. 钙钛矿材料端空间测算.....	40
<b>6. 投资建议.....</b>	<b>41</b>
<b>7. 风险提示.....</b>	<b>41</b>

## 图表目录

图 1 PERC 晶硅太阳能电池结构.....	5
图 2 CIGS 薄膜太阳能电池结构.....	6
图 3 太阳能技术发展路线图.....	6
图 4 钙钛矿矿石实物图.....	7
图 5 钙钛矿结构的三维示意图.....	7
图 6 钙钛矿太阳能电池结构.....	8
图 7 钙钛矿太阳能电池工作原理.....	8
图 8 太阳能电池认证效率图（蓝色、绿色和红色分为第一代、二代和三代太阳能电池）.....	10
图 9 不同太阳能电池对应带隙.....	10
图 10 晶硅和钙钛矿电池工艺温度（单位：℃）.....	11
图 11 晶硅和钙钛矿电池单瓦能耗（单位：KWh）.....	11
图 12 钙钛矿组件成本结构占比情况.....	11
图 13 光伏屋顶.....	12
图 14 光伏幕墙.....	12
图 15 车载光伏发电系统（CIPV）.....	12
图 16 钙钛矿电池面积与效率关系.....	13
图 17 钙钛矿太阳能电池内不稳定性的来源.....	14
图 18 钙钛矿电池稳定性解决方案.....	14
图 19 钙钛矿电池结构示意图.....	15
图 20 反式平面结构钙钛矿电池制作工序示意图.....	16
图 21 在线镀膜工艺生产图.....	17
图 22 离线 TCO 玻璃生产工艺示意图.....	17
图 23 空穴传输材料的结构示意图.....	18
图 24 典型的有机电子传输材料.....	19
图 25 旋涂法制备示意图.....	19
图 26 刮涂法制备示意图.....	20
图 27 狭缝涂布示意图.....	20
图 28 化学气相沉积法示意图.....	21
图 29 钙钛矿产业链.....	21
图 30 协鑫光电发展历程.....	24
图 31 内蒙古兆瓦级钙钛矿地面光伏项目.....	25
图 32 极电光能全球首条 GW 级量产线建设.....	25
图 33 仁烁光能钙钛矿车顶光伏玻璃.....	26
图 34 京山轻机发展历程.....	27
图 35 捷佳伟创发展历程.....	28
图 36 捷佳伟创大面积钙钛矿薄膜立式量产设备.....	29
图 37 微导纳米发展历程.....	29
图 38 德沪涂膜钙钛矿产业方案.....	31
图 39 帝尔激光发展历程.....	32
图 40 帝尔激光钙钛矿激光刻膜设备.....	33
图 41 迈为股份发展历程.....	33
图 42 德龙激光钙钛矿薄膜太阳能激光综合加工设备.....	34
图 43 大族激光划焊一体机.....	35
图 44 杰普特发展历程.....	35
图 45 杰普特大尺寸钙钛矿 P1/P2/P3 整套激光划线设备.....	36
图 46 金晶科技发展历程.....	37

图 47 亚玛顿发展历程 .....	37
图 48 丰联科光电（隆华科技子公司）发展历程 .....	38
图 49 阿石创发展历程 .....	39
表 1 三代太阳能电池对比表 .....	7
表 2 钙钛矿实验室效率提升过程 .....	9
表 3 三类 TCO 玻璃主要材料及特性比较 .....	16
表 4 空穴传输层材料 .....	18
表 5 主要钙钛矿电池产商产线进展 .....	22
表 6 一级市场钙钛矿相关融资情况 .....	23
表 7 主要镀膜方式比较 .....	26
表 8 钙钛矿镀膜设备厂商布局情况 .....	27
表 9 京山轻机钙钛矿及叠层电池组件主要产品 .....	28
表 10 微导纳米钙钛矿主要产品 .....	30
表 11 钙钛矿涂布设备厂商布局情况 .....	30
表 12 钙钛矿激光设备厂商布局情况 .....	32
表 13 TCO 玻璃厂商布局情况 .....	36
表 14 靶材在钙钛矿不同功能层制备中应用 .....	38
表 15 2023-2030 年钙钛矿设备空间测算 .....	39
表 16 2023-2030 年钙钛矿材料空间测算 .....	40
表 17 钙钛矿重点公司估值（截至 2024 年 02 月 22 日） .....	41

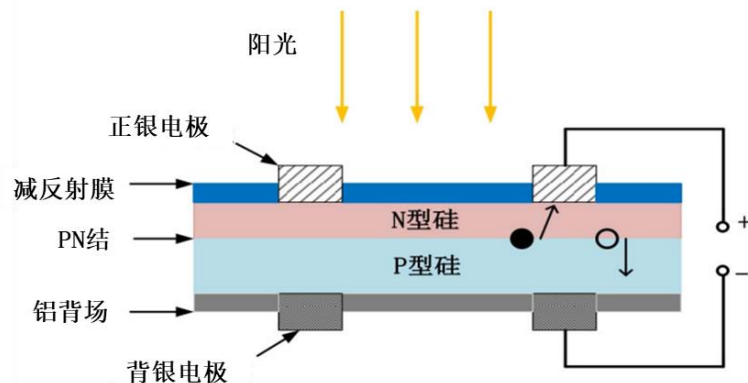
# 1. 钙钛矿接力成为第三代电池技术

## 1.1. 光伏电池技术发展

20 世纪 40 年代以来，以降本增效为核心目标，光伏电池技术持续迭代更新，目前已经由第一代逐步向第三代太阳能电池发展。

**第一代晶硅电池：**以多晶硅、单晶硅为代表的晶硅太阳能电池，是目前主流的电池技术路线。目前该技术已经发展成熟且应用最为广泛，但存在单晶硅太阳能电池对原料要求过高以及多晶硅太阳能电池生产工艺过于复杂等问题。从电池结构来看，晶硅电池经历了铝背场技术到钝化发射极和背面电池技术的发展进程。PERC 技术减少了背面复合损失，效率显著提高，已广泛应用于各类电站。随着 PERC 电池量产效率接近理论极限，晶硅太阳能电池向 N 型 TOPCon、N 型 HJT、BC 三条路径发展，TOPCon 电池凭借更高的性价比优势最先实现放量，有望在短期内接替 PERC 电池成为主流技术。尽管第一代晶硅电池仍保持最高转换效率，但受晶体硅本身吸光系数限制及能耗物耗影响，其提升空间已越来越小，随着时间的推移将逐步进入瓶颈期。

图1 PERC 晶硅太阳能电池结构



资料来源：帝科股份招股说明书，东海证券研究所

**第二代化学薄膜电池：**以铜铟镓硒 (CIGS)、碲化镉 (CdTe)、砷化镓 (GaAs) 为代表的化学薄膜太阳能电池，适合于 BIPV 等应用场景。薄膜太阳能电池采用直接带隙半导体材料替代晶硅，在理论上具有更高的转换效率和更低的生产成本。当前，碲化镉 (CdTe) 薄膜电池实验室效率达到 22.1%，产线平均效率为 15-19%；铜铟镓硒 (CIGS) 薄膜电池实验室效率达到 23.35%，产线平均效率为 15-17%；III-V 族 (GaAs) 薄膜电池实验室效率达到 29.1%，稳定性好，抗辐射能力强，在特殊应用市场具备发展潜力。与晶硅电池相比，薄膜电池由于量产转换效率低、稳定性较差、制备成本高等缺陷而难以大规模生产，市场份额远不如晶硅电池，但凭借重量轻、可透光、柔性化等优势，可在光伏建筑一体化 (BIPV) 等应用场景获得了一定的发展空间。

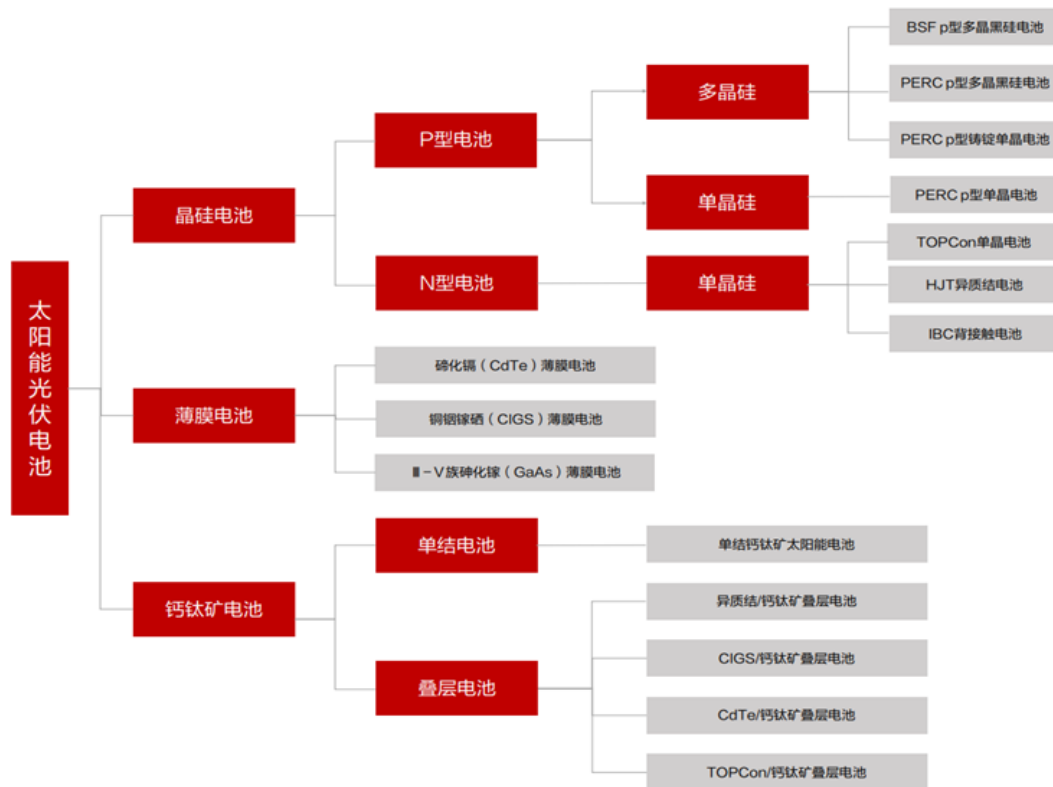
图2 CIGS 薄膜太阳能电池结构



资料来源:《薄膜光伏材料铜铟镓硒的研究进展》(房文健等), 东海证券研究所

**第三代新型薄膜电池:** 以钙钛矿电池 (PSCs)、染料敏化电池 (DSSC) 为代表的新型薄膜太阳能电池, 在效率提升和成本降低等方面均具备较大潜力。钙钛矿电池采用了钙钛矿结构的有机无机混合金属卤化物半导体作为吸收光的光伏材料, 厚度在 0.1-0.5 微米之间。这种材料兼具有机材料的优异光吸收性能和无机材料的高载流子迁移率, 被认为是最有希望实现高效率、低成本太阳能电池的材料。钙钛矿电池可分为单节太阳能电池和叠层太阳能电池两种技术路线, 其中, 与第一代晶硅太阳能电池叠加可构成异质结/钙钛矿叠层电池和 TOPCon/钙钛矿叠层电池; 与第二代薄膜太阳能电池叠加可构成 CIGS/钙钛矿叠层电池和 CdTe/钙钛矿叠层电池。

图3 太阳能技术发展路线图



资料来源: 中国光伏产业发展路线图, 东海证券研究所

表1 三代太阳能电池对比表

特性	第一代		第二代			第三代
	单晶	多晶	GaAs	CIGS	CdTe	PSCs
理论效率	29.4%		27%	33%	28%	33% (单结)
寿命	25年		20年 (CIGS、CdTe)			待验证
稳定性	稳定性非常好		稳定性较好			对外部环境较为敏感
材料成本	高纯度的硅原料		部分原料较难获取			原料价格低, 纯化要求不高
工艺流程	产业链环节多, 工序步骤多		/			产业链短
能源消耗	温度要求高, 消耗能源较多		相对较低			最高温度仅需 150℃

资料来源: 公开资料整理, 东海证券研究所

## 1.2. 钙钛矿电池原理

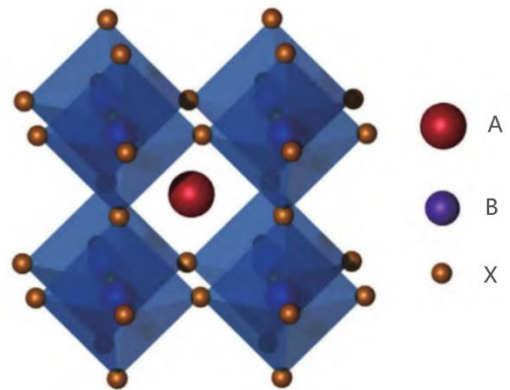
钙钛矿是一类具有与钙钛氧化物相同晶体结构的化合物。其化学结构为 $ABX_3$ 型, A位是有机阳离子, B位是二价金属离子, X位是卤素阴离子。其中A位离子占据了与十二个X离子共用的八面体位置, 而较小的B离子则稳定在与六个卤素阴离子共用的八面体位置。B位通常是 $Pb^{2+}$ 或者 $Sn^{2+}$ 为代表的二价金属离子。X位则通常是 $Cl^-$ 、 $Br^-$ 和 $I^-$ 卤素阴离子。通过调整A、B和X的含量可以获得不同组分的钙钛矿材料, 对应的带隙及能级分布也有所区别。

图4 钙钛矿矿石实物图



资料来源: 太阳能发电网, 东海证券研究所

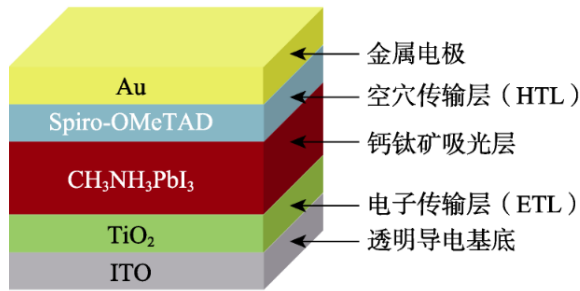
图5 钙钛矿结构的三维示意图



资料来源: 《钙钛矿太阳能电池研究进展与发展现状》(张生鹏等), 东海证券研究所

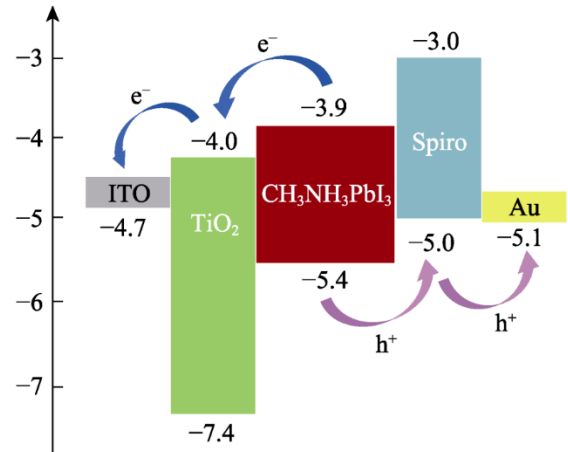
钙钛矿电池利用半导体的光生伏特效应发电。其具体原理是在太阳光的照射下, 具有高吸光系数的钙钛矿吸光层会大量吸收能量大于等于禁带宽度的光子, 使原本束缚在原子核周围的电子从价带顶被激发跃迁到导带底。与此同时, 为保持电中性额外产生了一个带正电荷的空穴, 这对被库仑力束缚的电子-空穴对即为激子。由于钙钛矿的激子结合能较低, 在内建电场的作用下会迅速解离成自由的电子和空穴, 其中自由电子通过电子传输层 (ETL) 向阴极传输, 最后被透明导电氧化物 (TCO) 电极收集; 自由空穴则通过空穴传输层 (HTL) 向阳极传输, 随后被金属电极收集。在外接电路与两端电极连接后, 器件会形成一个电流的回路, 由此实现光电转化。

图6 钙钛矿太阳能电池结构



资料来源:《钙钛矿太阳能电池材料制备、器件组装及性能测试综合实验设计》(杨广武等), 东海证券研究所

图7 钙钛矿太阳能电池工作原理



资料来源:《钙钛矿太阳能电池材料制备、器件组装及性能测试综合实验设计》(杨广武等), 东海证券研究所

## 2. 钙钛矿电池的优势与难题

### 2.1. 钙钛矿电池的优势

#### 2.1.1. 理论效率更高

钙钛矿实验室效率提升迅速,十余年间超越晶硅。自上世纪 70 年代发明晶硅电池以来,实验室最高转换效率记录为隆基绿能于 2022 年 11 月创造的 HJT 电池 26.8%。相比之下,钙钛矿电池在 2009 年首次制得时光电转换效率仅为 3.8%,经过十余年的发展,单结钙钛矿电池的实验室光电转换效率已高达 25.7%,由韩国蔚山科学技术研究所保持,而钙钛矿—晶硅叠层电池转换效率高达 32.5%,由德国柏林亥姆霍兹中心创造,目前钙钛矿电池实验室效率日新月异,潜力远超晶硅。



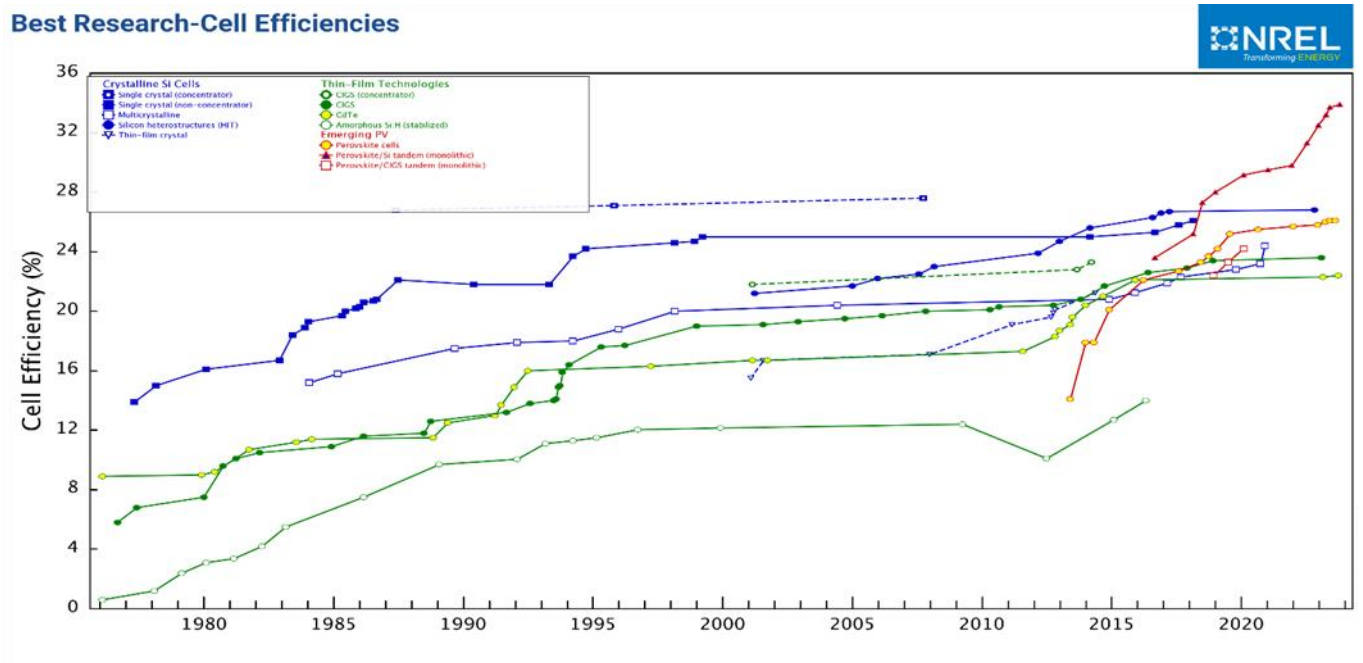
表2 钙钛矿实验室效率提升过程

时间	研发团队	电池类型	转换效率
2009	日本科学家 Miyasaka	单结钙钛矿太阳能电池	3.80%
2011	韩国成均馆大学 Nam-Giyu Park 课题组	单结钙钛矿太阳能电池	6.50%
2012	牛津大学 Henry Snaith HE 和 Mike Lee 课题组	单结钙钛矿太阳能电池	10.00%
2012	牛津大学 Henry Snaith	单结钙钛矿太阳能电池	15.40%
2014	韩国化学技术研究所以及成均馆大学	单结钙钛矿太阳能电池	17.90%
2016	瑞士洛桑联邦理工学院 (EPFL)	单结钙钛矿太阳能电池	19.60%
2017	韩国蔚山国立科技研究所	单结钙钛矿太阳能电池	22.10%
2018	中国科学院半导体研究所研究员游经碧课题组	单结钙钛矿太阳能电池	23.70%
2018	牛津光伏 (Oxford PV)	硅/钙钛矿叠层太阳能电池	27.30%
2019	韩国化学技术研究所 (KRICT)	单结钙钛矿太阳能电池	24.20%
2019	韩国化学技术研究所、麻省理工	单结钙钛矿太阳能电池	25.20%
2020	美国能源部国家可再生能源实验室	全钙钛矿叠层电池	23.10%
2020	亥姆霍兹中心 (HZB)	硅/钙钛矿叠层太阳能电池	29.15%
2020	香港城市大学、华盛顿大学	单结钙钛矿太阳能电池	25.50%
2020	牛津光伏 (Oxford PV)	硅/钙钛矿叠层太阳能电池	29.52%
2021	韩国蔚山国家科学技术研究所 (UNIST)	单结钙钛矿太阳能电池	25.50%
2021	亥姆霍兹中心 (HZB)	硅/钙钛矿叠层太阳能电池	29.80%
2022	加拿大多伦多大学 Edward H.Sargent 教授	全钙钛矿叠层电池	26.40%
2022	南京大学谭海仁教授课题组	全钙位矿叠层电池	26.40%
2022	南京大学谭海仁教授课题组	大面积钙钛矿叠层电池	24.20%
2022	洛桑联邦理工学院 (EPFL) 和瑞士电子与微技术中心 (CSEM)	硅/钙钛矿叠层太阳能电池	31.30%
2022	亥姆霍兹中心 (HZB)	硅/钙钛矿叠层太阳能电池	32.50%
2022	中国科学院半导体所	单结钙钛矿太阳能电池	25.60%
2023	中国苏州大学李耀文	柔性钙钛矿太阳能电池	23.40%
2023	中国科学院合肥物质科学研究院固体物理研究所等	单结钙钛矿太阳能电池	26.10%
2023	隆基绿能	硅/钙钛矿叠层太阳能电池	31.80%
2023	新加坡国立大学	单结钙钛矿太阳能电池	24.35%
2023	中国科学技术大学徐集贤教授团队	单结钙钛矿太阳能电池	26.10%
2023	隆基绿能	硅/钙钛矿叠层太阳能电池	33.90%
2023	美国西北大学	单结钙钛矿太阳能电池	25.10%

资料来源：东海证券研究所整理

单结钙钛矿电池理论转化效率可达 33%，远高于传统晶硅电池。晶硅电池理论上的光电转化极值为 29.4%，目前实验室环境中最高能达到 26.7%，正在逐步逼近效率天花板，因此可以预见其未来技术改进的边际收益也会越来越小。相比之下，钙钛矿的光电转化效率理论极值更高，单结电池即可达到 33%，如果把两块钙钛矿电池上下叠在一起形成叠层电池，其理论转化效率可进一步提升至 45%。

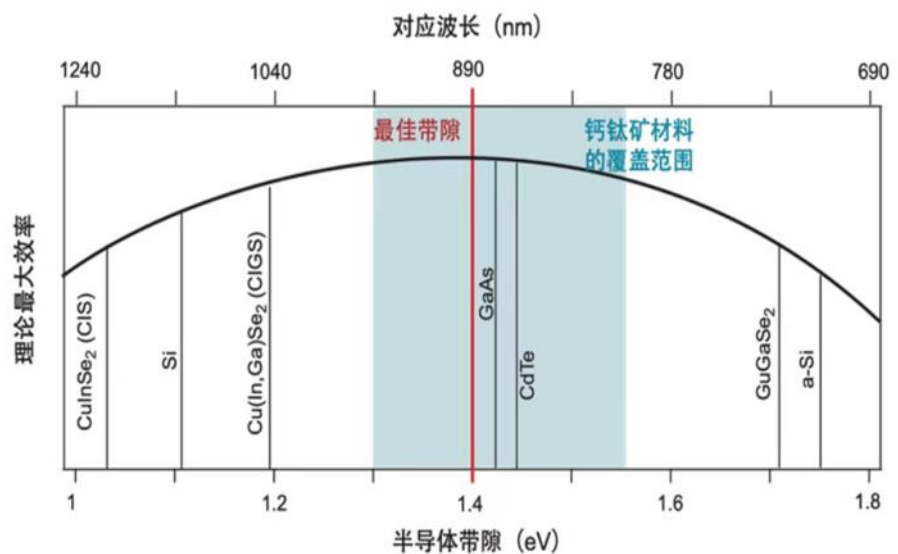
图8 太阳能电池认证效率图（蓝色、绿色和红色分为第一代、二代和三代太阳能电池）



资料来源：NREL，东海证券研究所

钙钛矿材料带隙根据组分的不同可在较大的范围内连续调节，以实现单结太阳能电池最大理论效率。带隙是决定半导体利用太阳光能力的根本因素之一，因为不同频率太阳光的能量不同，窄带隙半导体的电子不能被长波光所激发，宽带隙半导体虽然可利用的光波范围广，但光子能量的利用率低。与硅、砷化镓等拥有固定带隙的半导体材料不同，钙钛矿晶体成分本身具有多样性，其禁带宽度并不固定，可以随 $ABX_3$ 结构中各元素类型和含量不同而变化，理论范围达 1.15-3.06eV，并能实现连续可调。根据肖克利-奎瑟极限，单结太阳能电池的理想带隙应该为 1.4eV，而硅的带隙仅为 1.12eV，因此钙钛矿电池在转换效率方面超过晶硅电池。

图9 不同太阳能电池对应带隙



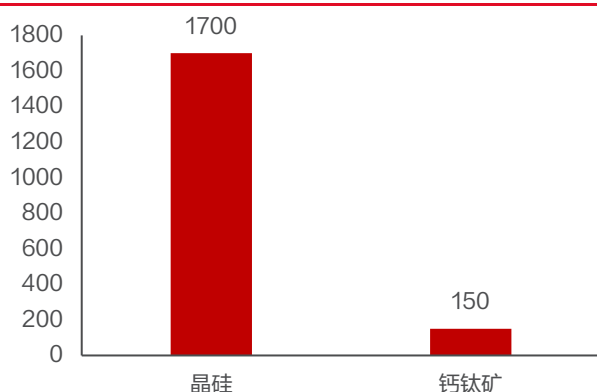
资料来源：索比光伏网，东海证券研究所

### 2.1.2.理论成本更低

**投资端：钙钛矿组件工艺流程简短，初始投资额低。**传统晶硅电池组件要经历硅料、硅片、电池片、组件四个生产环节，整个生产流程需耗时三天以上，而钙钛矿组件的生产可于同一个工厂内的流水线内集中完成，从玻璃、靶材、化工原料进入到组件成型仅需要 45 分钟，大大缩短制程耗时。此外，从产能投资额来看，晶硅组件四个环节单 GW 合计需要约 10 亿元投资，而目前的钙钛矿 50MW 中试线投资额在 1-1.5 亿元，120MW 产线投资额在 2 亿元左右，达到量产成熟度之后，单 GW 产能仅需 5 亿元投资额，约为晶硅电池投资额的二分之一。

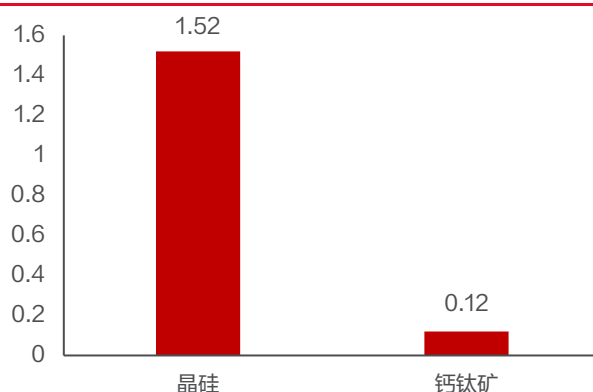
**生产端：钙钛矿组件生产能耗低，具有优越的环保性能。**钙钛矿组件制造过程中，工艺温度不超过 150℃，工艺流程短，整体能耗极低，每瓦组件能耗约为 0.12kWh，显著优于晶硅组件超过 1.52kWh 每瓦的能耗水平。此外，钙钛矿单结电池的能量回收时间仅为硅基电池的 23%，温室气体排放因子也仅为硅基电池的 43%，突显出钙钛矿组件更为环保的特性。

图10 晶硅和钙钛矿电池工艺温度（单位：℃）



资料来源：协鑫光电，东海证券研究所

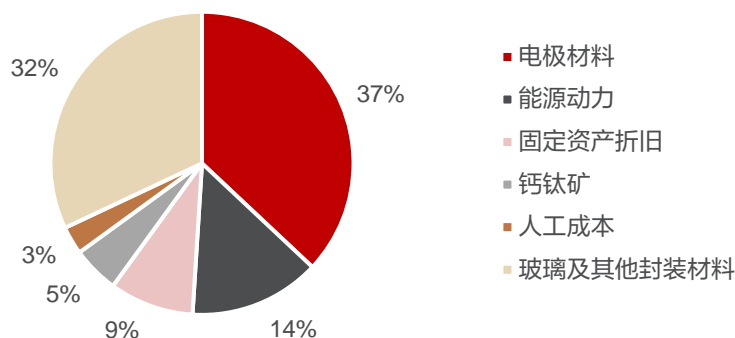
图11 晶硅和钙钛矿电池单瓦能耗（单位：KWh）



资料来源：协鑫光电，东海证券研究所

**材料端：钙钛矿电池原材料储量丰富、价格低廉。**钙钛矿晶体通常使用的有机盐，如甲胺、甲醚，以及金属铅盐和非金属卤素离子等材料，都十分常见，容易以低成本获取。钙钛矿电池的材料使用量相对较少，总厚度大约在 1μm 左右，而晶硅电池硅片厚度在 120-150μm。晶硅组件由于使用含铅焊带，因此每块组件含铅 16-18g，而钙钛矿每块组件含铅量小于 2g。此外，钙钛矿吸光材料对纯度相对不敏感，通常达到 95%即可满足使用需求，相比之下，晶硅电池需要使用高纯度的硅单质作为吸光材料，其纯度要求至少达到 99.9999%，从硅料开始，就需要投入大量成本用于提纯工艺。综合来看，进入量产的钙钛矿组件成本预计为 0.5-0.6 元/瓦，是晶硅组件极限成本的 50%，成本优势显著。

图12 钙钛矿组件成本结构占比情况



资料来源：中商产业研究院，东海证券研究所

### 2.1.3.应用场景更广

钙钛矿电池可以制成彩色和半透明薄膜，实现不同的彩色效果，因而可应用于 BIPV 领域。建筑集成光伏（BIPV）是一种创新型的技术应用，将光伏技术与建筑结构融为一体，涵盖了多种形式，如光伏屋顶、光伏幕墙、光伏遮阳板、光伏车棚和光伏站台等。在这些不同场景中，光伏屋顶和光伏幕墙是两个主要的子领域。光伏屋顶是一种能够同时提供建筑保护和清洁能源的绿色建筑类型，具有承重、隔热和防水功能。根据透光性的区分，光伏屋顶可分为光伏平屋顶、光伏斜屋顶以及光伏瓦片，过去主要采用晶硅组件。光伏幕墙将建筑幕墙结构与光伏发电功能相结合，实现了发电、美观、通风采光以及外部围护等多功能一体化。薄膜组件因其弱光效应好、透光率高、外观可定制等特点在光伏幕墙市场占据主导地位。然而，薄膜组件本身不透光，只能通过激光划线的缝隙吸收光线，因此其转换效率仅为 15% 左右。相比之下，钙钛矿电池组件在转换效率和制备成本上都具有优势，有望成为 BIPV 应用的首选。

图13 光伏屋顶



资料来源：恒通源官网，东海证券研究所

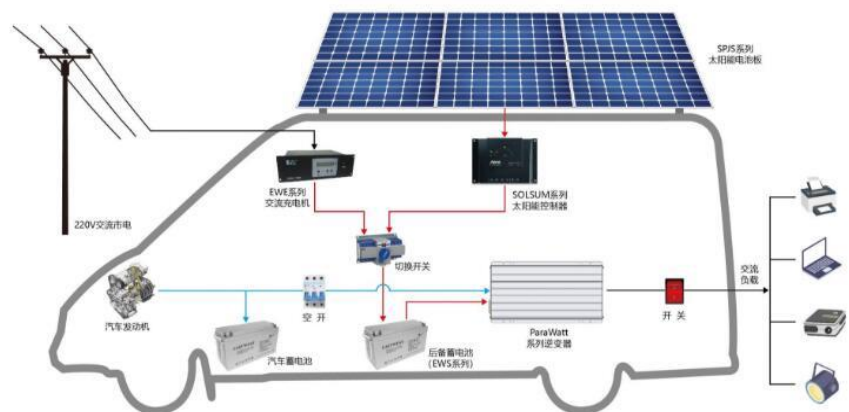
图14 光伏幕墙



资料来源：晶天新能源官网，东海证券研究所

消费类产品中使用钙钛矿光伏技术进行充电是一种创新的应用。钙钛矿太阳能光伏组件，由于其轻便灵活，发光效率高等特点，可制备成手机、电脑、背包等消费类产品的灵活充电配套设施。此外，钙钛矿技术还可应用于汽车充电，车载光伏发电系统（CIPV）是在汽车上安装一套完整的离网光伏发电系统。在用电时，通过太阳能充放电控制器，由后备蓄电池组为交流负载供电。如果有市电可用，还可以通过交流充电机迅速为后备蓄电池组充电。

图15 车载光伏发电系统（CIPV）



资料来源：泛华新能源，东海证券研究所

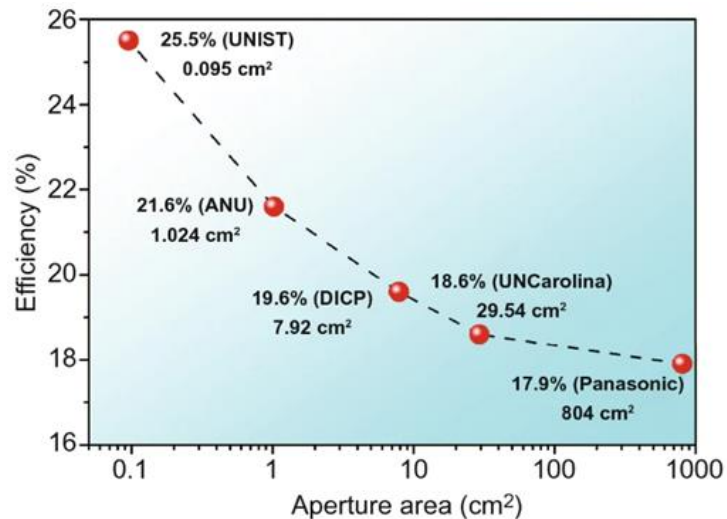
## 2.2. 钙钛矿电池的产业化难题

### 2.2.1. 大面积制备效率降低

钙钛矿电池在大面积制备中效率损失严重。钙钛矿电池随着制作尺寸的放大，其转换效率会发生明显下降，主要有两个方面原因：一是各层薄膜的非均匀大面积沉积，二是激光划线后电阻损耗增加并产生死区。目前钙钛矿电池实验室效率进展迅速，但大多仍基于小面积薄膜制备，效率超过 20% 的电池面积基本在 100 平方厘米以内，超过 1000 平方厘米后效率很难达到 18% 以上，远不及商业化普遍应用标准。

大面积制备钙钛矿层主要采用狭缝涂布和蒸镀法，两种工艺仍需完善。狭缝涂布法的主要问题是尚未有效解决钙钛矿的成核结晶问题，由于钙钛矿的晶体结构特性，随着制备面积的增大，如果不能对其进行完全干燥，则会产生结晶导致表面出现缝隙或气泡，从而影响电池的稳定性。风刀涂头技术可以在涂布的同时实现风干，有望解决钙钛矿干燥时间的核心问题。蒸镀法制备也存在一些产业化难点，一是设备成本较高，生产速率相对较慢，同时需要更频繁的清洗；二是该工艺对于钙钛矿层配方的调整兼容性较低；三是由于结晶大小和反应不彻底等因素，目前蒸镀法的效率记录普遍低于竞争路线。

图16 钙钛矿电池面积与效率关系

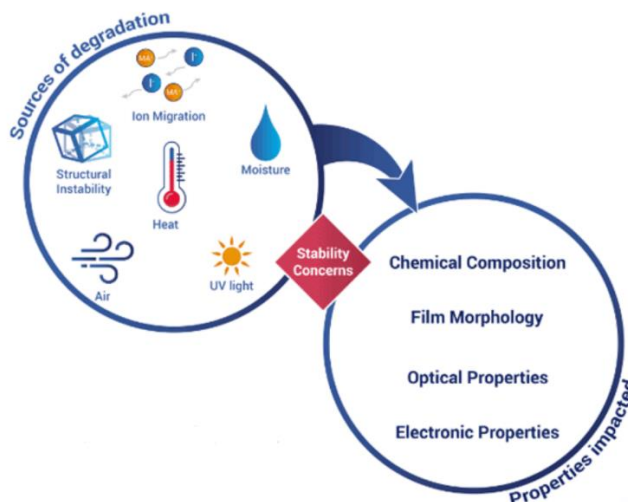


资料来源：SpringerLink，东海证券研究所

### 2.2.2. 稳定性较差

稳定性是制约钙钛矿电池产业化的重要因素。根据《太阳能钙钛矿电池技术发展和经济性分析》(潘莹, 2022年)中的分析, 目前钙钛矿电池生命周期内持续光照时间最长约 10000h, 若按平均日照时长 4h 计算, 理论寿命仅 6.8 年, 相比晶硅电池 25 年的理论寿命存在较大差距。钙钛矿稳定性差主要受到环境和内部因素的共同影响。一方面, 钙钛矿的吸光层的稳定性受环境因素影响, 表现为易水解、高温易分解、温度变化下相变、光照和氧气作用下发生光致分解等。另一方面, 吸光层会受电子传输层和电极材料影响。以正向结构为例, TiO<sub>2</sub> 作为电子传输层在光照下产生光生空穴催化分解吸光层; Spiro-OMeTAD 作为空穴传输层易受吸光层碘离子扩散影响而电荷传输性能下降; 电极材料常用贵金属, 但金属原子易扩散造成吸光层分解, 且钙钛矿材料具有明显的离子特性, 易发生离子迁移, 吸光层的碘离子也会对金属电极产生腐蚀。

图17 钙钛矿太阳能电池内不稳定性的来源



资料来源：Solar Magazine，IDTechEx，东海证券研究所

加强钙钛矿电池的稳定性可以从材料配方、结构优化、封装工艺三方面着手。材料配方方面，通过对吸光层、电子传输层和电极材料进行改良，可以有效提高电池稳定性。结构优化方面，通过在钙钛矿电池中加入缓冲层，可降低相邻层之间的影响，另外，制备复合电极如 ITO-铜-ITO 结构，避免出现离子转移的同时还可提升其导电性能。器件封装方面，采用 POE+丁基胶的封装方式，可基本解决外部的水氧因素导致的衰减。

图18 钙钛矿电池稳定性解决方案



资料来源：势银，东海证券研究所

### 3.钙钛矿电池制作工艺

#### 3.1.制备流程

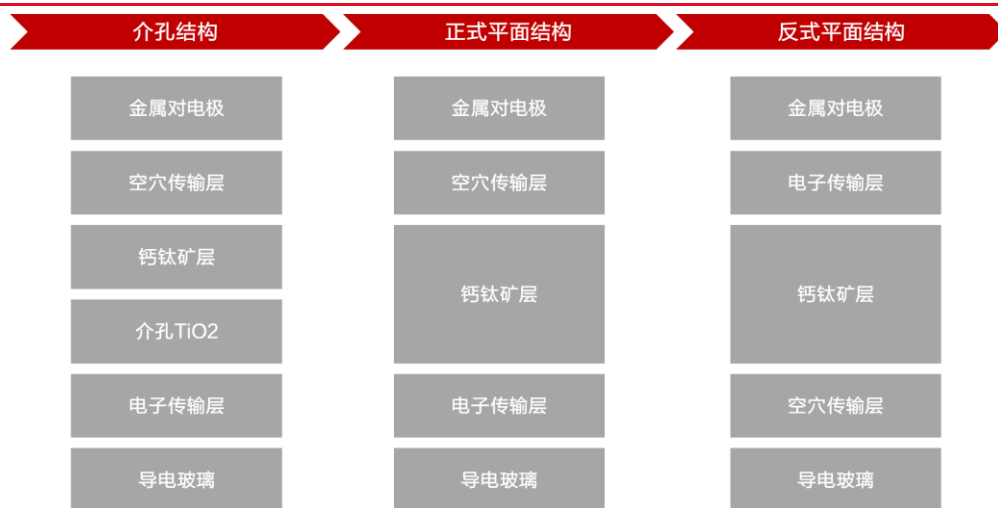
单结钙钛矿电池结构类似三明治层状，结构简单。单结电池在产业化进程中延伸出介孔结构和平面结构两种，其中，平面结构又可分为平面正式结构和平面反式结构。

**介孔结构钙钛矿电池需高温制备，工艺难度大。**介孔结构中，电子传输层（ETL）首先沉积在透明导电氧化物玻璃的导电面，即掺氟氧化锡（FTO）上，之后依次制备介孔二氧化钛、钙钛矿光吸收层、空穴传输层（HTL）和金属对电极。通过将二氧化钛作为介孔骨架，可增加电子传输层与钙钛矿光吸收层的接触面积，有效提高电子传输效率，但介孔结构往往需要 400-500℃ 的高温烧结，不利于大规模量产和柔性器件的制备。目前介孔结构实验室最高转换效率达 22.7%，与平面结构尚存在差距。

**平面结构钙钛矿电池工艺相对简单，反式结构相较正式结构在生产成本和稳定性方面更具优势，成为钙钛矿电池产业化进程中的主流结构。**平面正式结构与介孔结构相似，但减少了介孔电子传输层，省去了高温煅烧二氧化钛使其从无定形相转变为锐钛矿相的步骤，简化制备工艺的同时也导致电池对空间电场的分散能力更弱，故转化效率低于介孔结构。平面反式结构是在导电玻璃基底上先制备空穴传输层、然后再制备钙钛矿吸光层、电子传输层和金属对电极，传输层的排列与平面正式结构刚好相反。

目前，正式结构最高转换效率达 25.7%，反式结构随着界面钝化技术的突破和 PTAA 空穴传输层材料的导入，实验室最高转换效率已达 24.3%，正逐步缩小与正式结构间的差距。反式结构具备稳定性更好、电池迟滞性较小、填充率更高的优势，极电光能、协鑫光电等厂商均选用平面反式结构进行首次量产试制。

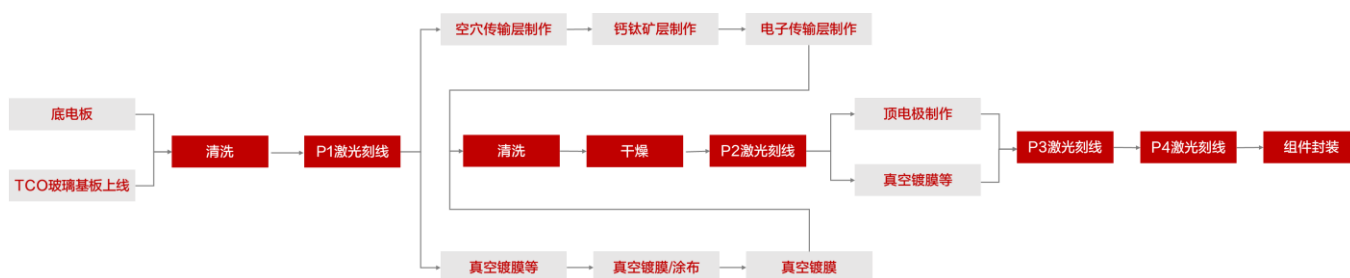
**图19 钙钛矿电池结构示意图**



资料来源：《单晶钙钛矿太阳能电池的设计与特性研究》（顾一帆），东海证券研究所

**单结钙钛矿电池与组件呈现一体器件，制作工序一体化，可分为前道电池制作和后道封装两部分。**前道电池制作主要是在玻璃基板上制作钙钛矿电池各功能层，并利用激光将电池片划分为若干子电池，形成串联结构。后道组件封装则是利用胶膜、玻璃盖板等将内部结构密封保护，并安装接线盒与外部电路连接的设备。目前钙钛矿组件的工艺流程尚未定型，各生产环节仍在进行持续的技术迭代。

图20 反式平面结构钙钛矿电池制作工序示意图



资料来源：格隆汇，东海证券研究所

### 3.2. 电极层

钙钛矿的电极层包括前电极和背电极。前电极一般选用透明导电氧化物 FTO 或者 ITO 通过溅射法沉积在透明的基板上，连同基板一起作为整个电池的衬底。背电极材料在单电池器件中多选用导电性好的贵金属，如 Au 或 Ag，为控制成本也会使用金属 Cu 或 Al 替代。

TCO 镀膜玻璃用作薄膜太阳能电池前电极，具备良好的透光率和导电性能。TCO 镀膜玻璃即透明氧化物导电玻璃，是在平板玻璃表面通过物理或者化学镀膜的方法均匀地镀上一层透明的导电氧化物薄膜，主要包括铟、锡、锌和镉氧化物及其复合多元氧化物薄膜，占薄膜太阳能电池总成本的 24% 左右。按照导电膜材料不同，可分为 ITO 玻璃、FTO 玻璃和 AZO 玻璃，分别采用  $\text{In}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SnO}_2$  和  $\text{ZnO}$  作为靶材。

表3 三类 TCO 玻璃主要材料及特性比较

类别	ITO 玻璃	FTO 玻璃	AZO 玻璃
导电膜材料	掺锡的氧化铟 $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ ，稀有元素铟稀缺	掺氟的氧化锡 $\text{SnO}_2:\text{F}$ (掺铋的氧化锡 $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ )，原料不稀缺	掺铝的氧化锌 $\text{ZnO}:\text{Al}$ ，原料不稀缺
性能	导电性能在目前是最好的，生产成本较高，容易被氧化	很好的绒面结构	成本最高，有很好的透光性和导电特性，性能较好，但不耐潮
生产工艺	磁控溅射 (PVD)	化学气相沉积法 (CVD)	磁控溅射 (PVD)
发展阶段	成功量产	成功量产	试生产阶段
应用领域	电器显示屏	电器显示屏电池	多结的薄膜电池
生产厂家	三星、NSG、Geomatic	板硝子、旭硝子、AFG	欧瑞康、莱宝、仕贵真空

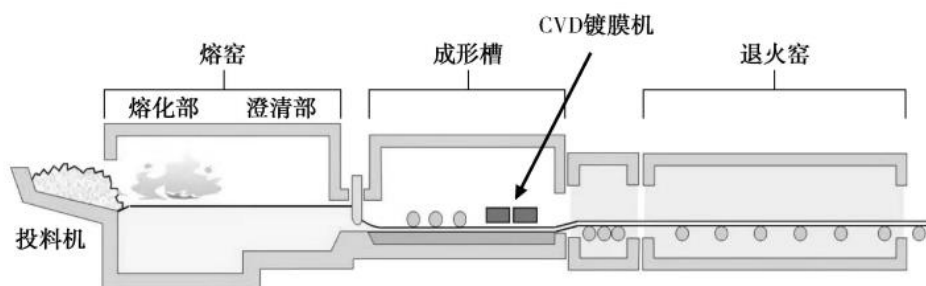
资料来源：亚玛顿招股说明书，东海证券研究所

镀膜工艺是 TCO 镀膜玻璃制备的核心技术，可分为在线和离线镀膜两种。在线镀膜在浮法线上生产玻璃的时候就镀上膜层，主要采用 CVD 气相沉积法；而离线低辐射镀膜是在玻璃已经生产甚至钢化完成之后才被镀上膜，主要采用 PVD 磁控溅射法。

在线镀膜生产成本低、效率高，膜层性能稳定。在线镀膜是在浮法玻璃生产线锡槽的上方，安装镀膜设备，通过反应、蒸发将金属氧化物沉积在加热的浮法玻璃表面，工艺设备相对简单。其优势在于镀膜工艺集成在玻璃成型过程中，涂层与基体结合强度高，物理性能稳定。劣势在于镀膜工艺温度在  $400\text{--}700^\circ\text{C}$ ，高温下的工艺参数较难调控，并且热稳定性较差的 ITO、AZO 靶材无法适用于该工艺，目前只有 FTO 在线镀膜工艺较成熟。



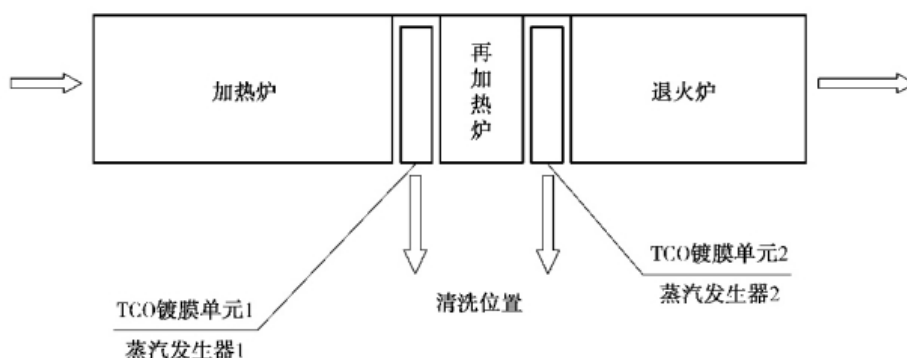
图21 在线镀膜工艺生产图



资料来源：《在线 Low-E&TCO 镀膜玻》（孟庆瑞），东海证券研究所

**离线镀膜技术成熟，工艺调整灵活度高。**离线镀膜将超白浮法玻璃经过清洗、预加热，通过磁控溅射技术镀膜，然后冷却、刻蚀，完成镀膜。沉积层在真空条件下获得的，膜层的纯度高，镀膜设备模块化设计，产能调整方便。该工艺温度在 200-230℃，ITO 和 AZO 可通过离线镀膜方式进行制备，但由于需另起镀膜线进行二次加热，其制造成本较高。

图22 离线 TCO 玻璃生产工艺示意图



资料来源：《蒸汽发生器在 TCO 玻璃生产中的应用》（蒋振伟等），东海证券研究所

### 3.3.空穴传输层

**空穴传输层（HTM）具有优化界面、调节各层能级匹配等作用。**选择合适的空穴传输材料，可以改善界面间的肖特基接触，促使电子和空穴的有效分离，减缓电荷复合，同时能加快空穴的传输，提高电池性能。空穴传输层材料需要适合的光透明性和能级，能使光较好到达活性层，有效阻挡电子泄漏且空穴传导性好，在大气环境下化学性能稳定且与相邻层不发生化学反应。

**空穴传输材料归纳为有机小分子类、有机聚合物类和无机材料类。**有机小分子类材料具有很好的流动性，能更好地填充介孔骨架，根据分子的结构主要分为含三苯胺的螺旋小分子的空穴传输材料、星形和线形结构的空穴传输材料与含噻吩结构的小分子空穴传输材料。聚合物类材料主要分为含有噻吩结构和含有苯胺结构的两类，前者主要通过引进噻吩和苯并噻二唑等使空穴传输材料有光吸收能力，与钙钛矿形成互补，还可通过掺杂碳纳米管、石墨烯等来提高其空穴迁移率，改善电池的性能；后者聚合单元主要为三苯胺等，空穴迁移率普遍较高，是目前 PCE 较高的一类钙钛矿太阳能电池。无机 p 型半导体材料具有可用溶剂处理、高空穴迁移率和宽带隙等特点。大部分有机空穴传输材料含有碳碳双键，在光照下易断裂，

而无机材料不含碳碳双键，制得的电池更加稳定，是作为廉价高效的空穴传输材料的良好选择。

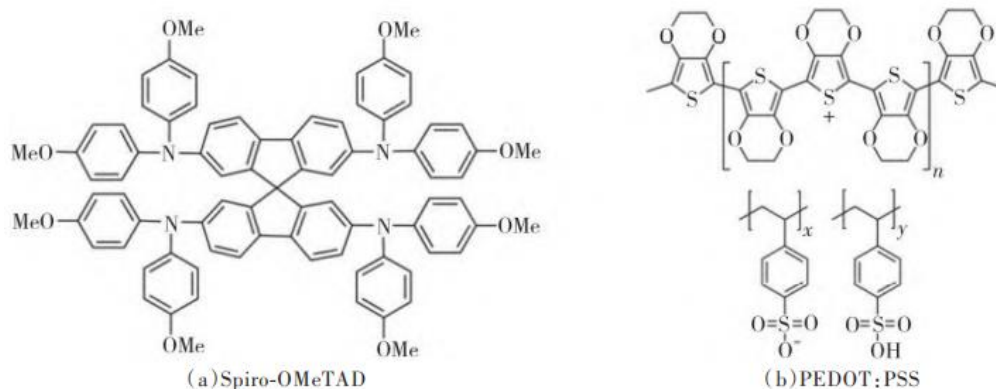
**表4 空穴传输层材料**

材料类型	材料	材料特性
有机小分子类	Spiro-OMeTAD、OMeTPA-FA	具有很好的流动性，能更好地填充介孔骨架
有机聚合物类	PEDOT:PSS、P3HT、PTAA	具有较好的成膜性和迁移率
无机材料类	CuI、CuSCN、NiO、Cu <sub>2</sub> O	可用溶剂处理、高空穴迁移率、宽带隙

资料来源：东海证券研究所整理

目前空穴传输层的研究主要集中于材料开发。从成本角度来看，无机空穴传输层成本较优，CuI、CuSCN、NiO、Cu<sub>2</sub>O成本都在 15 千克/美元及以下。从光电转换效率来看，有机空穴传输层转换效率较高，FDT、PTAA、Spiro-OMeTAD、PEDOT:PSS 都在 18%以上，而无机空穴传输材料中 NiObium 转换效率明显优于其他材料。从开路电压来看，有机与无机空穴传输层没有明显区别。从产业化应用来看，在 n-i-p 型钙钛矿太阳能电池中常用的空穴传输材料包括有机小分子（Spiro-OMeTAD），而在 p-i-n 型器件中则常用聚合物（3, 4-乙烯二氧噻吩-聚苯乙烯磺酸酯，PEDOT:PSS）及无机金属氧化物（NiO<sub>x</sub>）等作为空穴传输材料。

**图23 空穴传输材料的结构示意图**



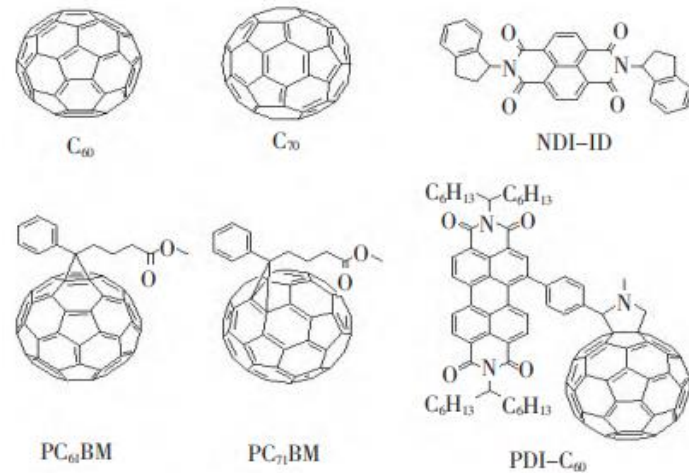
资料来源：《钙钛矿太阳能电池及其空穴传输研究综述》（王茹等），东海证券研究所

### 3.4. 电子传输层

电子传输层（ETL）在器件中起到抽取和传输电子及阻挡空穴的作用。电子传输层是钙钛矿器件结构的最基本组成之一，其构成材料与光活性层的成膜质量、界面电荷的快速提取以及能级匹配等密切相关。因而，电子传输材料在钙钛矿的光伏性能及稳定性调控方面发挥着重要作用。良好的电子传输材料需要在可见光范围内具有良好的光透射率和电子迁移率，以减少光能损失；还具有极好的化学稳定性和热稳定性，以防止其与相邻的钙钛矿层或金属电极逐渐发生反应；同时，ETL 的能级应与钙钛矿材料的能级相匹配，从而提高电子提取效率并有效阻挡空穴。

电子传输材料主要分为金属氧化物和有机化合物两大类。金属氧化物材料主要包括TiO<sub>2</sub>、ZnO、SnO<sub>2</sub>等，具有带隙可调、透光率高、载流子运输能力强等优点，常用于 n-i-p 结构钙钛矿太阳能电池。有机化合物材料主要包括富勒烯及其衍生物、C<sub>60</sub>、C<sub>70</sub>和基于萘二酰亚胺（NDI）的小分子等，具有良好的成膜性和优异的电子传输特性等优点，常用于 p-i-n 结构钙钛矿太阳能电池。

图24 典型的有机电子传输材料



资料来源:《钙钛矿太阳能电池电子传输层的研究进展》(韩飞等), 东海证券研究所

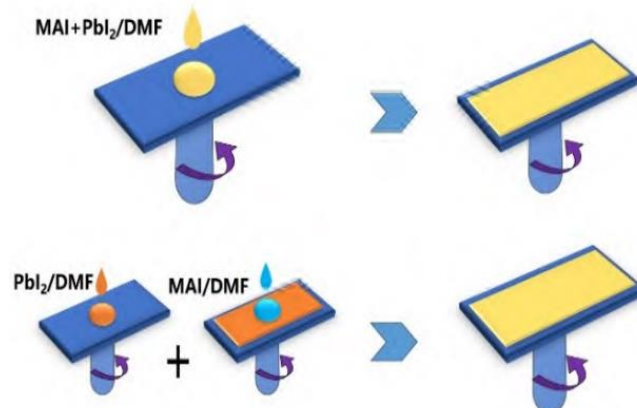
### 3.5. 钙钛矿层

钙钛矿层是最核心的功能层，薄膜质量直接决定了钙钛矿组件的效率和稳定性。钙钛矿层可实现光能转化为电能，而其余功能层都是为了最大化利用钙钛矿层的功能而设计的。化学式  $ABX_3$  的钙钛矿材料中，A 位阳离子以甲胺离子、甲脒离子为主，B 位阳离子一般为铅离子，X 位阴离子以碘离子为主，可以进行溴离子及氯离子的掺杂。A、B 以及 X 位不同离子的选取影响钙钛矿材料的晶格、带隙等微观参数，宏观上表现为钙钛矿材料的稳定性、光吸收能谱等性质的变化，对钙钛矿组件整体的稳定性、表面颜色以及 PCE 等性能造成影响。

钙钛矿光活性层的制备工艺繁多，包括湿法和干法两类工艺。湿法工艺按选用技术分为旋涂法、刮刀法和狭缝涂布法等。旋涂法因成本低、操作方便广泛应用于实验室的小面积 PSC 器件；而对于大面积钙钛矿光活性层的制备，狭缝涂布法拥有可连续生产、材料利用率高等其他湿法工艺所不具备的突出优点。干法工艺具有大面积厚度和均匀性更好控制、基底平整度要求低等优势，理论上更适合晶硅叠层路线。

旋涂法是目前制备钙钛矿薄膜最常用的方法。旋涂法分为一步法和两步法，是将溶液滴加在基底中央，通过高速旋转的方式将薄膜沉积在基底上。虽然目前报道的高性能实验室尺度的钙钛矿薄膜几乎都是通过旋涂法制备的，但当器件基底面积较大时，在旋涂的过程中容易形成中间厚周边薄的不均匀分布，降低薄膜的质量，并且旋涂法在制备过程中会浪费掉大量的溶液，因此旋涂法并不适用钙钛矿的产业化生产。

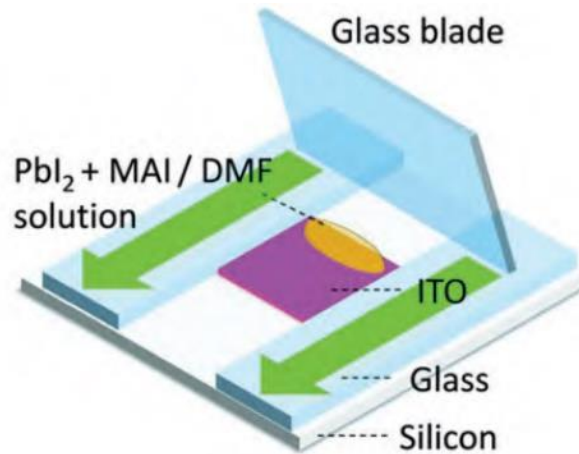
图25 旋涂法制备示意图



资料来源:《大面积钙钛矿太阳能电池制备方法综述》(梁振群等), 东海证券研究所

刮涂法在制备大面积模组制备中显示出较高的发展潜力。刮刀涂布法利用刮刀与基底之间的相互运动,使得钙钛矿前驱液均匀分散在基底表面,从而形成致密薄膜。相较于旋涂法,刮涂法能够节约大量的溶液并且在刮涂过程中,溶液可以在基底上平铺并湿润,一定程度上避免了缺陷与孔洞的产生。

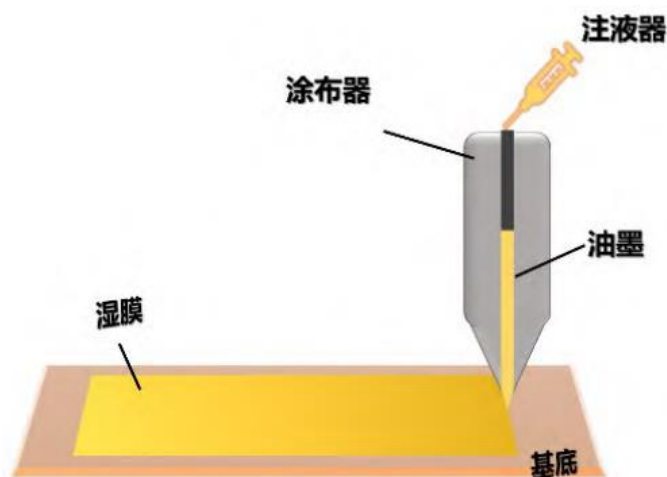
图26 刮涂法制备示意图



资料来源:《大面积钙钛矿太阳能电池制备方法综述》(梁振群等), 东海证券研究所

狭缝涂布法作为一种精密的涂布技术,具有涂布速度快、精度高、湿度和薄膜厚度均匀等优点。狭缝涂布法是通过程序控制涂布头吸取储存罐中的油墨并按一定的时间空间参数挤出在基底上,从而形成连续薄膜的一种方法。与刮涂法相比,狭缝涂布法制备过程中,涂布头无需与基底接触,避免了基底被涂布头刮伤,钙钛矿的薄膜厚度可以通过控制油墨的浓度和粘度、涂布头与基板之间的间隙、涂布的速度、油墨的进墨速度以及气刀的压力决定,而这些参数都可以通过程序提前设置。

图27 狭缝涂布示意图

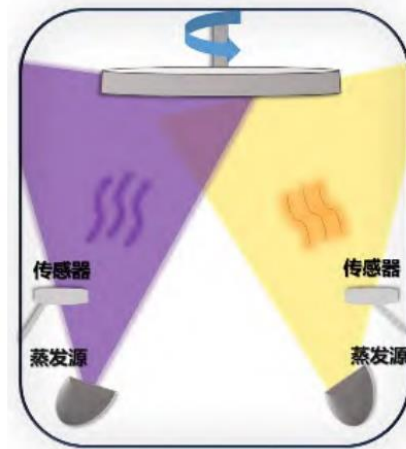


资料来源:《大面积钙钛矿太阳能电池制备方法综述》(梁振群等), 东海证券研究所

化学气相沉积法是一种在大面积基底上制备均匀薄膜的有效方法。化学气相沉积法是将钙钛矿固体材料放置在蒸发源上加热,当加热源达到一定的温度之后,固体材料升华,均匀的沉积到基底上。该方法还可以在不同形貌的基底上实现保形生长,从而适应复杂的器件结构。化学气相沉积法与工业化连续生产的要求相兼容,有利于提高生产效率。然而,化学气相沉积法也有一些局限性。一方面,该方法需要较高的真空条件,因此对于沉积设备的性能

和稳定性有较高的要求。另一方面，该方法需要使用高纯度的原材料，这会增加钙钛矿组件的制备成本。

图28 化学气相沉积法示意图



资料来源:《大面积钙钛矿太阳能电池制备方法综述》(梁振群等), 东海证券研究所

## 4.国内钙钛矿产业化进展梳理

钙钛矿目前尚处于从 0 到 1 的产业化初期, 相比晶硅太阳能电池其产业链更短。从新技术放量顺序来看, 设备厂商将最先收益, 需重点关注激光、涂布、镀膜等核心设备供应商, 其次, TCO 玻璃、封装材料和靶材等关键辅材确定性较高, 技术路径相对清晰; 最后, 电池厂商以初创企业为主, 发展空间更具弹性。

图29 钙钛矿产业链



资料来源: 公开资料整理, 东海证券研究所

### 4.1.钙钛矿制造端

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/226111154142010054>