



## 光伏设备专题报告

# 钙钛矿电池：光伏发展新方向，关注产业链动态变化

【华西机械团队】

毛冠锦：S1120523020001

2023年2月26日

请仔细阅读在本报告尾部的重要法律声明

- **钙钛矿优势显著多方关注度日益提升，市场潜力大发展空间广阔**
- **钙钛矿太阳能电池（PSCs）具有可调节的带隙，高吸收系数和长的载流子扩散长度等特性，是最有发展潜力的薄膜光伏技术。**钙钛矿材料在太阳能电池领域取得了突破性的进展，通过改进钙钛矿材料配方、器件制造流程和高质量的成膜方法，小面积单节钙钛矿太阳能电池光电转换效率持续突破新高，钙钛矿领域的研究已进入规模化生产的探索阶段，代表企业有协鑫光电、纤纳光电、极电光能等。但目前钙钛矿电池的制备仍存在稳定性、铅污染及大面积制备效率尚低等工艺难点。
- **钙钛矿材料占总成本比例小，设备投资额有望进一步降低。**以协鑫光电100MW产业为例，其生产线组件成本小于1元/W，预计5-10GW级别量产线组件成本降至0.5-0.6元/W，远低于晶硅生产成本1元/W。晶硅1GW的产能（包含硅料、硅片、电池、组件）投资额在10亿元左右，而协鑫钙钛矿的第一条100MW的设备产线投资在1亿元左右，1GW产能投资额规模化之后预计约为5亿元。
- **钙钛矿光伏电池的制备中，钙钛矿吸光层、ETL、HTL是制备工艺中的核心环节。其中，钙钛矿吸光层的制备是最核心的环节。**
- **钙钛矿层：**高效钙钛矿电池的首要条件是钙钛矿吸收层形貌，均匀度，结晶度，覆盖度，晶粒尺寸和晶粒取向质量均较高。对于钙钛矿薄膜的大面积制备技术，如何控制大面积薄膜均匀性（厚度约500nm）和降低薄膜的缺陷密度仍然是一个挑战。目前主要集中于MAPbI<sub>3</sub>钙钛矿的研究，大面积通常采用狭缝涂布工艺。
- **空穴传输层（HTL）：**第一类是无机物和有机金属化合物（有氧化铜，碘化亚铜，氧化镍（NiO）和硫氰化铜（CuSCN））、一类是聚合物（如PSS、PTAA等）。若是氧化镍，通常用喷涂、喷雾热解制备或者是用PVD法制备。若选择PTAA等有机物，采用刮涂或是喷雾热解制备。
- **电子传输层（ETL）：**若为有机材料通常采用蒸镀工艺，若为金属氧化物，通常采用气象沉积工艺如PVD或RPD设备、材料包括TiO<sub>2</sub>、ZnO、SnO<sub>2</sub>、WO<sub>x</sub>、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、富勒烯及其衍生物等。
- **非金属电极：**非金属电极是透明导电氧化层（TCO），通常使用ITO和FTO。FTO可以耐500°高温，主要用于烧结TiO<sub>2</sub>的场合，比如介孔层，采用TiO<sub>2</sub>作为电子传输层的器件。ITO的透光性和导电性优于FTO，但不耐高温，通常用于低温和柔性器件。通常采用PVD磁控溅射制备。
- **背电极：**包括金属电极和碳电极。金属电极通常采用真空蒸镀、磁控溅射镀制备；碳电极通常采用涂布法。
- **设备厂商率先受益，关注产业链动态。**下游企业加速布局百兆瓦级中试线，大面积制备已具备一定基础，部分企业GW级产线已提上日程。产业发展处于0-1阶段，我们认为设备企业有望率先受益，捷佳伟创、德龙激光、京山轻机、大族激光等走在前列。关注其他领域的涂布、真空镀膜等设备公司可能在钙钛矿电池领域中的动态。
- **投资建议：**鉴于行业正处于初期，蕴含较大机遇，我们给予行业“推荐”评级。
- **受益标的：**捷佳伟创、京山轻机、德龙激光、大族激光、帝尔激光、杰普特、迈为股份、科恒股份、奥来德、恩曼斯特（未上市）等
- **风险提示：**钙钛矿电池产业化进度不及预期；行业竞争加剧；下游行业景气度不及预期；公开信息有误。

一

钙钛矿电池：行业概述

二

钙钛矿电池：工艺与设备

三

钙钛矿电池：产业链分析

四

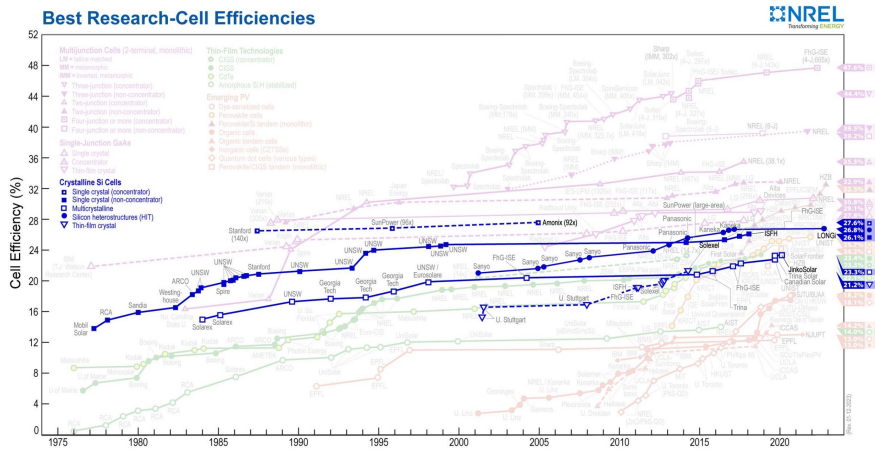
投资建议、受益标的及风险提示



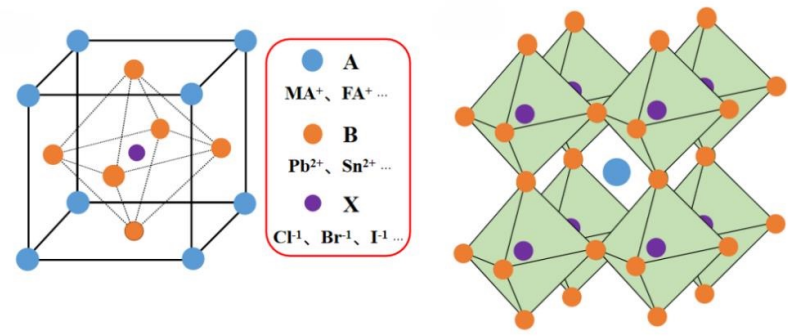
# 一、钙钛矿电池：行业概述

- **太阳能电池是指可以有效吸收太阳能，并将其转化为电能的半导体部件。目前太阳能电池已发展至第三代。1）硅晶太阳能电池：**以单晶硅、多晶硅为代表，是目前技术发展成熟且应用最广泛的太阳能电池，但仍存在单晶硅太阳能电池原料要求高及多晶硅太阳能电池生产工艺复杂等问题；2）**化学薄膜太阳能电池：**主要以碲化镉（CdTe）、砷化镓（GaAs）、铜铟镓硒（CIGS）为代表，相较晶硅电池所需材料少易于进入量产化阶段，但仍存在部分金属材料价格昂贵、材料纯度要求高的问题；3）**新型薄膜太阳能电池：**主要有染料敏化太阳能电池（DSSCs）、**钙钛矿太阳能电池（PSCs）、量子点太阳能电池（QDSCs）**等，具有效率提升速度快、成本低等优势，已受到产业界的广泛关注。
- **钙钛矿：**本指化学式为 $\text{CaTiO}_3$ 的矿物质以及拥有为 $\text{CaTiO}_3$ 结构的金属氧化物。发展至今，钙钛矿已经成为化学式为 $\text{ABX}_3$ 的物质的术语，正八面体结构，钙钛矿材料具备高光电系数、长载流子扩散长度、可人工合成等特点。钙钛矿太阳能电池是利用钙钛矿型的有机金属卤化物半导体作为吸光材料的太阳能电池。

图表：太阳能电池分类及效率



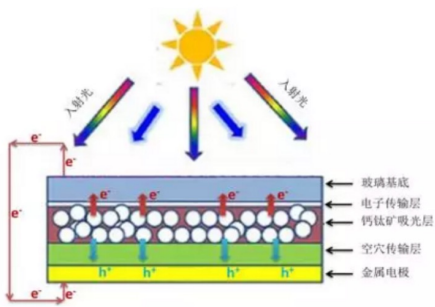
图表：钙钛矿晶格结构



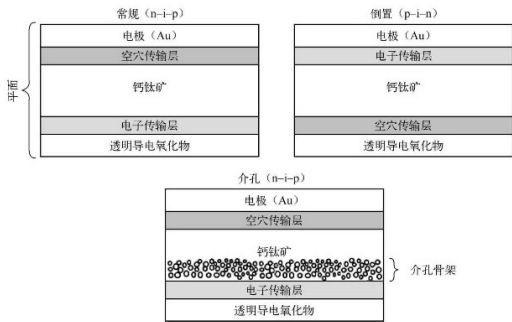
资料来源：NREL，《低成本制备高效率钙钛矿太阳能电池的研究》（吕凤），华西证券研究所

- **钙钛矿太阳能电池基本原理**：光生伏特效应。工作机制总体可以分为五个过程，即光子吸收过程（产生激子）、激子扩散过程、激子解离过程（分离为电子和空穴）、载流子传输过程和电荷收集过程。经过五个过程后，自由电子通过电子传输层后被阴极层收集，自由空穴通过空穴传输层后被阳极收集，两极形成电势差，电池与外加负载构成闭合回路，回路中形成电流。
- **常见高效钙钛矿太阳能电池结构是透明导电氧化物（FTO或ITO），电子传输层（ETL）、钙钛矿吸光层、空穴传输层（HTL）、金属电极（背电极）。**根据电子传输层与空穴传输层位置不同，可分为正式结构电池（n-i-p）与反式结构电池（p-i-n）；根据电荷传输层的形貌结构，可分为介孔结构和平面结构。
- **介孔结构**：采用TiO<sub>2</sub>作为介孔骨架，相较平面结构散光效果好、接触面积大、成膜均匀光滑。但由于制备工艺复杂、能耗高，或不利于大规模制备量产。
- **正式（常规）结构**：无介孔电子传输层，制备更简单灵活，减少了500°C高温煅烧TiO<sub>2</sub>的步骤，但相较介孔结构效率略差。
- **反式（倒置）结构**：构成为导电玻璃基地上先制备HTL、钙钛矿吸光层、ETL及金属对电极，制备工艺简单、成膜温度低、成本低，是目前产业化进程中的主流结构。

图表：钙钛矿电池发电原理示意图



图表：钙钛矿电池三种主要结构



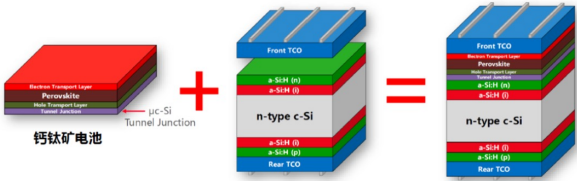
图表：钙钛矿电池结构及作用、特点

| 钙钛矿电池结构          | 作用及特点                                                                                 |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 透明导电氧化物（FTO或ITO） | 起透光和导电作用，同时满足高透过率、高迁移率和低方阻的要求；透过率85%以上，目前已成熟和应用                                       |
| 电子传输层（ETL）       | 具有较高电子迁移率，便于接收由钙钛矿层传输的电子，并将其传至阳光极中                                                    |
| 钙钛矿吸光层           | 有机金属卤化物钙钛矿为核心，吸收材料属于直接带隙半导体，具有高效光吸收性能；钙钛矿层吸收光子产生激子，由于非常低的库仑力束缚，在室温下激子随后迅速分离成自由的电子和空穴。 |
| 空穴传输层（HTL）       | 与钙钛矿层保持良好接触，更好实现空穴传输                                                                  |
| 金属电极             | 目前广泛应用于高效钙钛矿太阳能电池对电极的是金和银                                                             |

- 钙钛矿太阳能电池还可分为单结电池和多结叠层电池。单结电池相较于多结叠层电池效率更低，主要为平面反式结构，目前在市场上广泛应用。多结叠层电池则主要通过叠层方式与HJT、IBC等电池组合，实现吸收光谱互补，可以突破传统晶硅电池理论效率极限，提升光伏电池转换效率。目前两端叠层电池效率已经突破28%。
- 钙钛矿晶硅叠层电池结构有多种。2-T叠层电池又称集成一体化结构，是指在硅电池上生长钙钛矿电池，采用中间层连接两个子电池；4-T叠层电池又称为机械堆叠结构，是指将带隙较大的钙钛矿电池作为顶电池，将带隙较小的晶硅电池作为底电池，通过简单堆叠形成叠层电池，顶电池和底电池分别保留其正负极，构成4个终端结构。另外，还有光谱分离的四端叠层电池、反射结构的四端叠层电池、三端叠层等。

图表：钙钛矿/晶硅叠层太阳电池结构

图表：在HJT电池表面涂覆一层做钙钛矿电池



图表：钙钛矿/晶硅叠层（2-T）电池效率进展

| 单位         | 电池结构        | 效率Eff  | 时间      |
|------------|-------------|--------|---------|
| 柏林亥姆霍兹中心   | 钙钛矿/晶硅      | 29.8%  | 2021.11 |
| 荷兰应用科学研究组织 | 钙钛矿/晶硅（HJT） | 29.2%  | 2021.11 |
| 牛津光伏       | 钙钛矿/晶硅，2T   | 29.52% | 2020.12 |

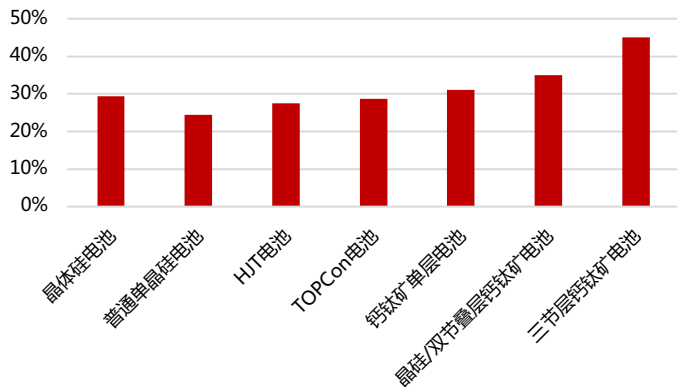
| 种类               | 介绍                                                                                                                                           | 图例 |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 机械堆叠的四端叠层电池（4-T） | 含义<br>将两个子电池独立制备后堆叠在一起，相互之间只有光学耦合作用。四端叠层电池对电极有较高的要求，要求四个电极中其中三个为透明电极，进光面电极需要具备在宽光谱范围内的高透过，中间两个电极需要具备在红外光谱范围内的高透过。                            |    |
|                  | 优点<br>这个结构的优点是各个子电池的制备工艺不互相制约，能各自采用最优的工艺条件。四端叠层电池在工作过程中，两个子电池可以分别保持在最大功率点，这减少了顶电池带隙选择的限制，当顶电池带隙为1.6~2eV，叠层电池都能获得较高的效率。                       |    |
|                  | 缺点<br>采用四端结构意味着功率电子元件要加倍，相应地，度电成本将提高。                                                                                                        |    |
| 两端叠层电池（2-T）      | 含义<br>在晶硅电池上直接生长钙钛矿电池，中间通过复合层或隧道结将两个子电池串联起来。                                                                                                 |    |
|                  | 优点<br>与四端叠层电池相比，两端叠层电池仅需要一个宽光谱透明电极，有利于降低制造成本。                                                                                                |    |
|                  | 缺点<br>两端叠层电池限制：首先串联电池的电流由两个子电池中较小的电流决定，因此，要求两个子电池具有近似的电流。其次，顶电池直接沉积在底电池上，要求顶电池功能层的制备不能影响底电池的性能，同时底电池表面成为顶电池的衬底，传统绒面结构的晶硅底电池为制备高性能钙钛矿电池带来了挑战。 |    |



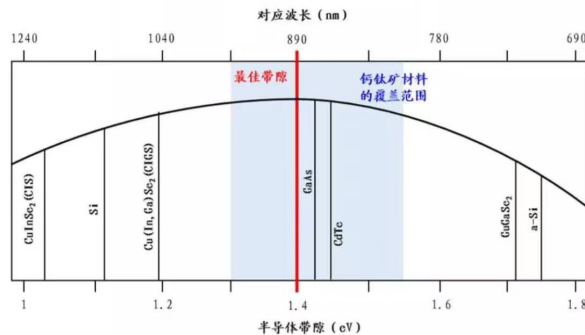
# 钙钛矿电池优势显著：极限效率和发电量高

- **钙钛矿电池光电转化效率理论极限高于晶硅电池。**根据权威测试机构德国哈梅林太阳能研究所（ISFH）测算，普通单晶硅太阳能电池理论极限转换效率为24.5%，HJT电池理论极限转换效率为27.5%，TOPCon电池理论极限转换效率为28.7%。而单层钙钛矿电池理论极限转换效率高达31%，钙钛矿双节钙钛矿效率极限高达35%，三节钙钛矿理论极限效率为45%。钙钛矿电池转换效率极限高主要原因在于其禁带宽度适宜、钙钛矿材料带隙宽度可调以及无组件效率损失。
- **禁带宽度适宜：**过宽的带隙宽度会使得被吸收的光子过少。例如 $\text{MAPbI}_{3-x}\text{Br}_x$ 中，随x的变化可实现带隙 1.5~2.3eV连续可调。
- **带隙宽度可调：**通过调整A、B和X含量可以获得不同组分钙钛矿材料，对应钙钛矿材料的带隙及能级分布也各不相同，通过对钙钛矿进行组分调控，可实现带隙连续调控，这也决定了钙钛矿可以广泛应用在发光、光伏和光探等领域。根据上海交大物理与天文学院官微显示，数值计算表明使用带隙为1.72eV的钙钛矿与1.12eV的晶硅结合，理论叠层效率高达43%。

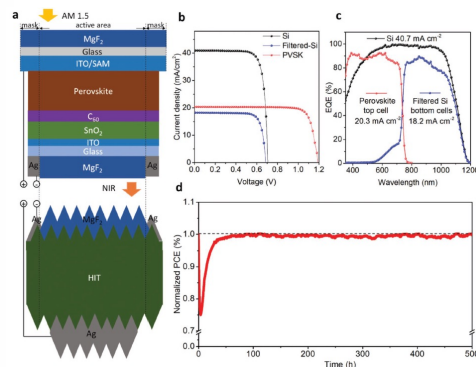
图表：不同太阳能电池理论极限转换效率对比



图表：钙钛矿带隙宽度适宜且可调



图表：宽带隙钙钛矿半透明电池及晶硅叠层电池器件性能



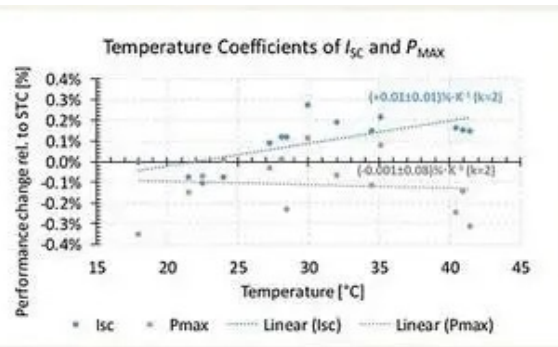
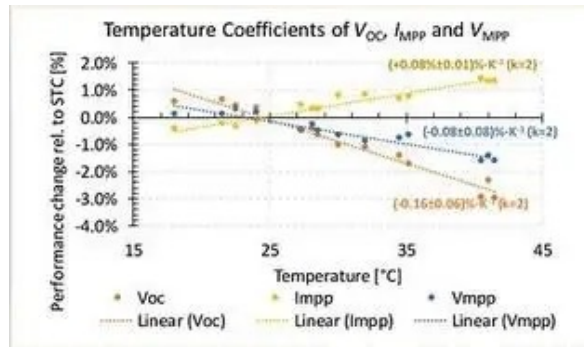
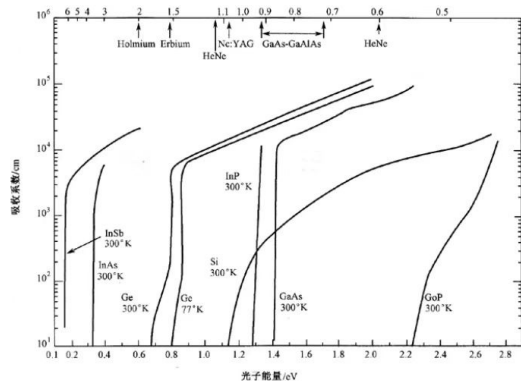


# 钙钛矿电池优势显著：极限效率和发电量高

- **钙钛矿电池发电量高**：主要原因在于其抗衰减性强、具有低温度系数、吸收系数高且弱光效应好。
- **抗衰减性强**：钙钛矿电池无PID效应与LID效应。PID效应又称电势诱导衰减，电池片与其接地金属边框间高电压作用下出现离子迁移，大量电荷聚集于电池片表面使其表面钝化，最终导致组件效率下降。LID效应是指光致衰减效应，一般发生于P型掺硼硅片制作的电池片中。但PID、LID效应不会显著影响钙钛矿的发电量。协鑫光电表示，目前大多数先进实验室已经可以实现钙钛矿组件连续工作至少1000小时不衰减，协鑫光电100MW产线下线产品的使用寿命预计将超过25年。
- **具有低温度系数**：相较晶硅低两个数量级，高温条件下效率受影响较低。晶硅组件的温度系数是-0.3左右，即温度每上升1度，功率会下降0.3%。而钙钛矿的温度系数为-0.001，接近于0，因此实际发电效率就会显著高于晶硅。
- **吸收系数高**：光吸收系数是指在单位浓度及单位厚度时的吸光度。钙钛矿层厚度为百纳米，晶硅电池光吸收系数仅 $10^3\text{cm}^{-1}$ ，而钙钛矿吸收系数达 $10^5\text{cm}^{-1}$ ，光系数高，弱光效应强，阴天及室内等弱光条件下转换效率更高。

图表：不同半导体材料光吸收系数及波长关系

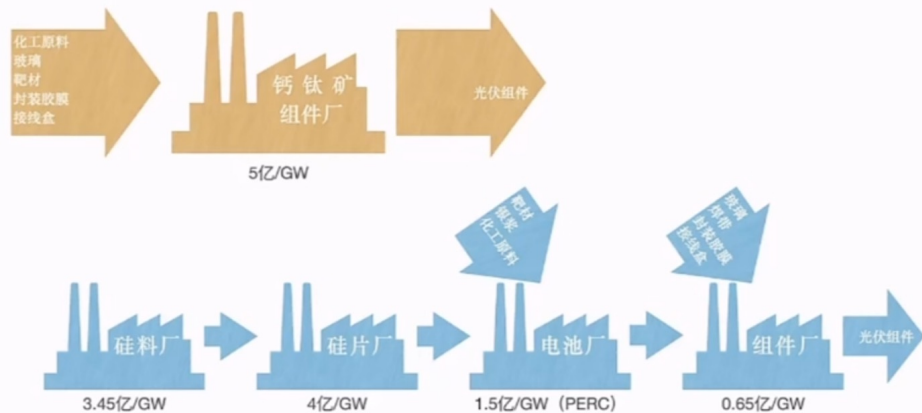
图表：钙钛矿温度系数接近于0



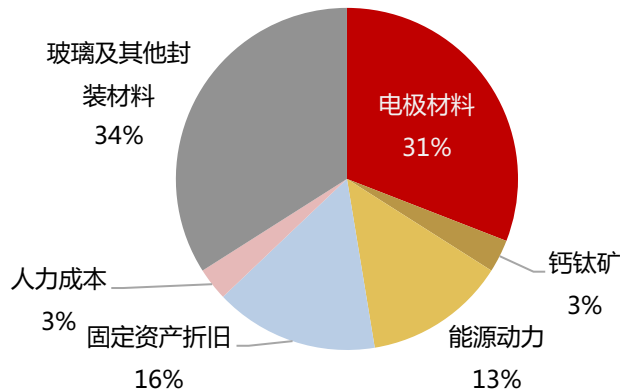
# 钙钛矿电池优势显著：成本低

- **钙钛矿电池相较于晶硅电池投资成本、生产成本均较低。**钙钛矿太阳能电池的制程耗时明显减少，一体化工厂大幅降低生产成本。晶硅电池需要至少在四个不同的工厂分别加工硅料、硅片、电池、组件，单位制程至少需要3天以上，同时还需要大量的人力、运输成本等。根据协鑫纳米的数据，钙钛矿太阳能电池的生产流程较为简单，仅需45分钟就可将玻璃、胶膜、靶材、化工原料等在一个工厂内加工成组件，极大地缩短了制程耗时，简化了流程，价值高度集中，成熟期后单GW投资成本将降至5亿元。钙钛矿材料占总成本比例小，以协鑫光电100MW产业为例，其生产线组件成本小于1元/W，预计5-10GW级别量产线组件成本降至0.5-0.6元/W，远低于晶硅生产成本1元/W。
- **钙钛矿电池产能投资额仅为晶硅产能投资额的一半，成本进一步降低。**根据协鑫光电，晶硅1GW的产能（包含硅料、硅片、电池、组件）投资额在10亿元左右，而协鑫钙钛矿的第一条100MW的设备产线投资在1亿元左右，1GW产能投资额规模化之后预计约为5亿元。

图表：钙钛矿电池流程短、成本低



图表：协鑫100MW级别组件成本构成



- **钙钛矿电池下游应用范围广阔。钙钛矿电池可以应用于BIPV。**
  - **1) 透光性能好，弱光性高：**虽然传统晶硅组件具有较高转化率，但在BIPV场景应用中，由于组件接收光照角度差、无法达到最佳光照条件，组件转化效率低。而钙钛矿电池基于其弱光性能强，能在弱光条件下达到更高光电转换效率，安装要求低，发电时间更长。同时传统晶硅组件须通过电池片排布改变透光性，而钙钛矿具有更高透光度。
  - **2) 满足结构多样化市场需求：**在BIPV领域应用中已涉及弧面等多种形态。钙钛矿既可以采取刚性基板，又可采用柔性基板，易于加工成弯曲半径更小的弧面形状。
  - **3) 满足颜色多样化需求：**BIPV建筑对色彩要求较高，而传统晶硅组件多为蓝色，色彩单调，而钙钛矿则可调整颜色，满足市场对色彩的多样化需求。
  - **4) 经济型好：**传统电池重量大，对建筑的支撑要求高，建造成本高；而钙钛矿电池自重轻，建造应用中成本及难度均较低。
- **钙钛矿电池可用于车顶光伏制作。**由于钙钛矿具有高弱光性，较差天气条件下仍可维持稳定发电。目前现代汽车、长城汽车、特斯拉等均有布局车顶光伏。

图表：BIPV应用



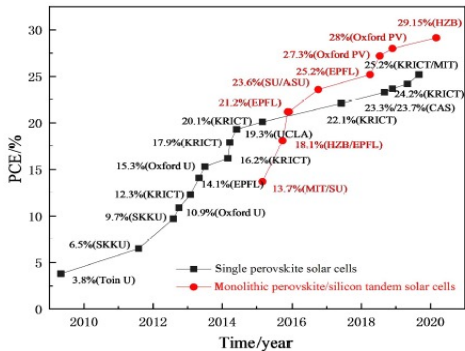
图表：光伏车顶



# 钙钛矿电池：小面积实验室效率进展飞速

- 钙钛矿自2009年来，各类型钙钛矿实验室效率均进展飞速。
- 单结钙钛矿电池：2009年由日本科学家首次提出，初始实验室效率为3.8%，2017年由韩国蔚山国立科技研究所首次突破20%，截至2022年已提升至25.6%。
- 硅/钙钛矿叠层太阳能电池：2018年牛津光伏首次提出叠层太阳能电池，效率为28%，远高于当期单结钙钛矿电池。2022年，北京曜能科技有限公司研发团队研发的小面积钙钛矿叠层电池光电效率达32.44%，创国内转换效率记录。
- 全钙钛矿叠层电池：在2020年由美国能源部国家可再生能源实验室提出，效率为23.1%。目前国内仁烁光能团队所研发的全钙钛矿叠层电池转换效率已高达29%。

图表：钙钛矿电池效率进展



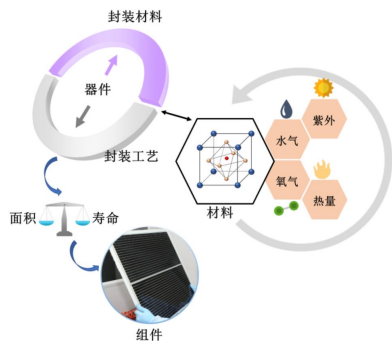
图表：钙钛矿实验室效率进展

| 时间   | 团队                  | 电池           | 转换效率   |
|------|---------------------|--------------|--------|
| 2009 | 日本科学家               | 单结钙钛矿太阳能电池   | 3.80%  |
| 2011 | 韩国成均馆大学课题组          | 单结钙钛矿太阳能电池   | 6.50%  |
| 2012 | 牛津大学Henry Snaith    | 单结钙钛矿太阳能电池   | 15.40% |
| 2016 | 瑞士洛桑联邦理工学院          | 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课题组      | 单结钙钛矿太阳能电池   | 23.70% |
| 2018 | 牛津光伏                | 硅/钙钛矿叠层太阳能电池 | 28.00% |
| 2019 | 韩国化学技术研究所           | 单结钙钛矿太阳能电池   | 25.50% |
| 2020 | 亥姆霍兹中心（HZB）         | 硅/钙钛矿叠层太阳能电池 | 29.15% |
| 2020 | 牛津光伏                | 硅/钙钛矿叠层太阳能电池 | 29.52% |
| 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% |
| 2022 | 中国科学院半导体所           | 单结钙钛矿太阳能电池   | 25.60% |
| 2022 | 瑞士洛桑联邦理工&瑞士电子与微技术中心 | 硅/钙钛矿叠层太阳能电池 | 31.30% |
| 2022 | 南京大学谭海仁教授课题组        | 全钙钛矿叠层电池     | 28.00% |
| 2022 | 仁烁光能团队              | 全钙钛矿叠层电池     | 29%    |
| 2022 | 普林斯顿大学              | 大面积钙钛矿叠层电池   | 21.70% |
| 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 | 北京曜能科技研发团队          | 硅/钙钛矿叠层太阳能电池 | 32.44% |
| 2023 | 澳洲国立大学（ANU）         | 串联硅-钙钛矿太阳能电池 | 30.3%  |

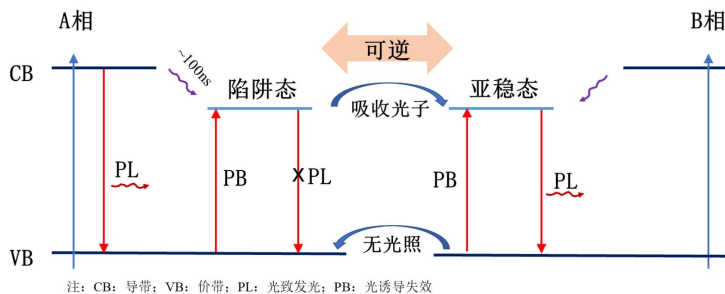


- **目前钙钛矿电池产业化进程中存在稳定性差的问题。主要可分为外部原因与内部原因：1) 外部原因：主要是钙钛矿电池中的吸光层易受水氧、加热或温度变化、光照条件等影响。2) 内部原因：包括传输层、电极材料对钙钛矿稳定性的影响。**
- **温度：**对钙钛矿材料稳定性涉及到材料热分解、晶体结构转变、相界和晶界变化等。
- **光照：**对钙钛矿材料的分解影响包括两方面，首先是光照和氧气共同作用下钙钛矿材料产生光生电子与氧气结合产生超氧负离子，其强氧化性和不稳定性加速钙钛矿材料分解；其次是持续光照下拉曼光谱发生变化，从而使钙钛矿材料结构发生变化。
- **传输层及电极材料的影响。**在正向结构中 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ 等在光照条件下产生光生空穴并催化分解钙钛矿材料，且酸性 $\text{ZnO}$ 具有腐蚀作用，加速钙钛矿分解与器件老化。常见电极材料有金、银、铝等，会通过扩散作用进入钙钛矿层并分解钙钛矿；同时，钙钛矿材料中的卤素离子会扩散至金属电极中，并造成电极材料的腐蚀，从而造成器件性能衰减。
- **针对稳定性问题现有如下解决方案：**1) 提升器件内部稳定性。通过优化钙钛矿材料、传输层及电极材料稳定性，增加缓冲层等；2) 后处理钝化。有课题组采用两步后处理法钝化钙钛矿表面和晶界中缺陷，将器件效率提升至15.27%；3) 采用封装工艺隔绝外部因素影响。需满足化学惰性、具有长久阻水阻氧阻紫外线、低耐热性等特点。

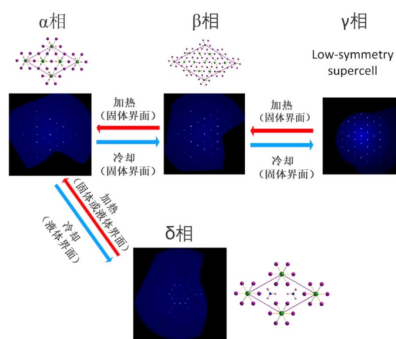
图表：钙钛矿太阳能电池稳定性影响因素



图表：光照下钙钛矿材料分解机理



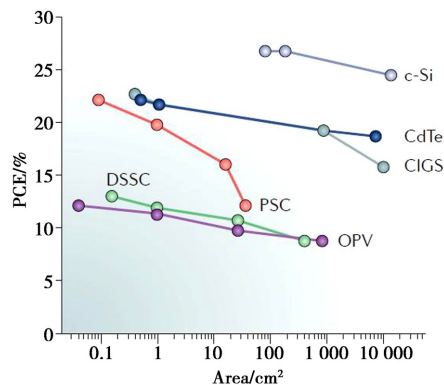
图表：温度对钙钛矿材料影响



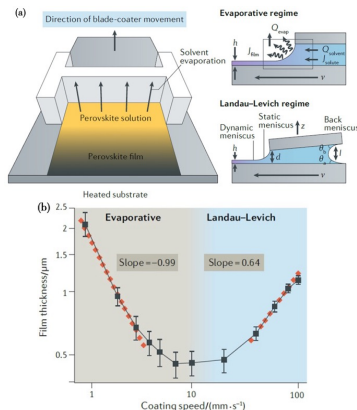
# 钙钛矿电池：产业化受限，已有部分解决方案—效率尚低

- **目前钙钛矿电池产业化进程中存在大面积制备效率低的问题。**根据《大面积钙钛矿薄膜制备技术的研究进展\_杨志春等》一文中描述，目前薄膜太阳能电池面积每增加一个数量级，光电转化效率约下降0.8%。**主要有如下三个原因：1) 钙钛矿薄膜大面积制备工艺多元化且并不成熟，导致薄膜均匀度较差，孔洞增加，缺陷增多；2) 与器件结构相关的有效光照面积减小，导致组件短路电流密度减小；3) 大面积制备进行激光划线易产生电阻损耗、死区面积增大。**
- **目前大面积薄膜制备方法主要有刮刀涂布法、狭缝涂布法、喷涂法、喷墨打印法、气象沉淀法等。**在刮刀涂布法中存在刮涂速度影响湿膜厚度的问题，目前采用针对性的设计钙钛矿前驱体墨水组分来制备大面积钙钛矿薄膜；喷涂法中由于液滴大小和沉积位置不确定性大，导致待沉积区域须有多液滴才能保证覆盖，原料使用效率低且部分污染，目前通过低挥发性溶剂引入控制挥发和喷涂速度平衡。
- **激光划线工艺将薄膜模组分割为子电池。**每个电池中都有一条P1、P2、P3线，其中P1线最外侧至P3线最外侧为死区，死区越小，有效发电面积越大，转化效率越高。目前通过增加隔离层、提高设备精度、对划线工艺实时追踪等减少死区面积。

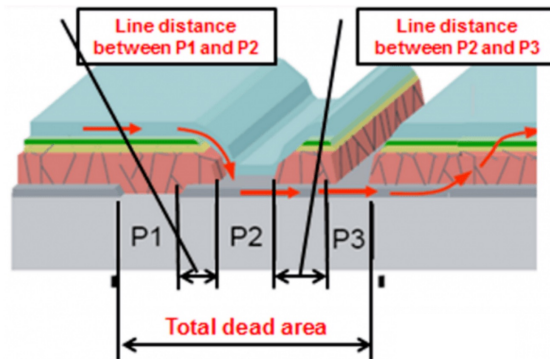
图表：不同类型太阳能电池PCE与器件面积关系



图表：刮刀涂布法&刮涂速度和厚度关系



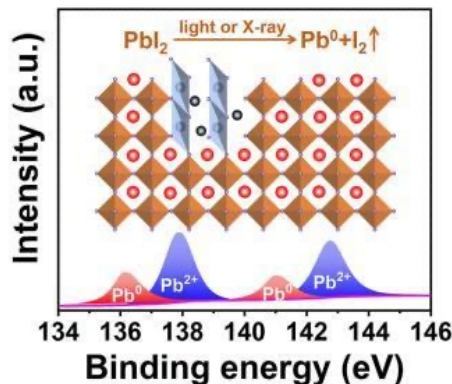
图表：钙钛矿死区示意图



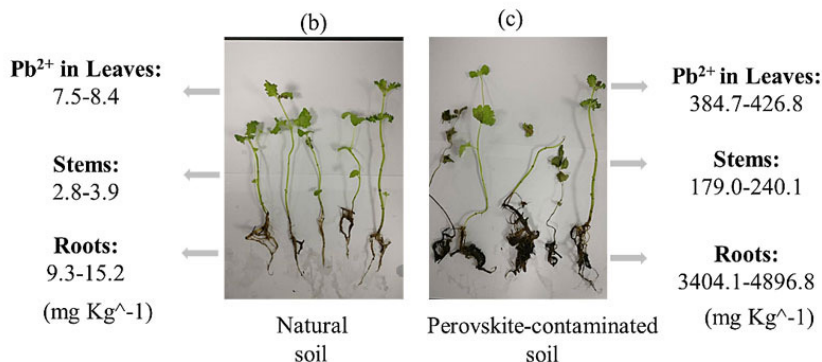


- **目前钙钛矿电池产业化进程中存在水溶性铅污染的问题。**钙钛矿电池铅污染的来源主要有：1）制备过程中溶液含有铅，且为制备较厚的钙钛矿薄膜，溶液中的铅含量较高，残留的碘化铅（ $\text{PbI}_2$ ）降解形成 $\text{Pb}^0$ ，抑制钙钛矿结晶，同时诱导更多深能级缺陷，降低器件效率同时加速器件衰减；2）钙钛矿电池若处理不当，其残留的碘化铅浸入土壤后，被植物吸收进入食物链，相对于其它人类活动代入环境中的铅，其迁移性高10倍以上。
- **碘化铅具有水溶性。**晶硅行业用铅量远高于钙钛矿行业。在晶硅组件中，常采用含铅焊带，焊接是铜箔涂铅，铅含量不超过0.1%，一般一块晶硅组件中的铅含量约为18克；而钙钛矿组件中的铅含量不足0.01%，不超过2克。但晶硅太阳能电池组件中的铅后续变成氧化铅，不溶于水；钙钛矿中的碘化铅溶于水，浸出后易造成土壤污染。
- **目前无法实现钙钛矿完全去铅化。**目前已有多种铅隔离工艺，在电池表面包覆透明铅隔离膜，防止电池老化处理不当或损坏后铅离子泄露污染地下水和土壤，或包裹新材料吸收铅；及内置低成本的介孔磺酸基铅吸附树脂，将支架内的铅离子固定化。

图表：钙钛矿中 $\text{Pb}^0$ 形成机理图



图表：铅基钙钛矿材料污染土壤种植情况



■ 2022年钙钛矿企业频繁获资本青睐：

- 2022年12月协鑫光电完成5亿元B+轮融资，由淡马锡投资、红杉中国、IDG资本三家领投，川流投资等机构跟投，将用于完善协鑫光电100MW大尺寸钙钛矿组件产线的工艺和设备开发。
- 极电光能完成2.2亿元Pre-A轮融资，并宣布2022年2月150MW生产线投产。2022年10月仁烁光能完成数亿元PreA轮融资，由三行资本领投，用于150MW钙钛矿组件量产线落地。
- 2022年脉络能源完成数千万元天使轮融资，由国新思创领投，本轮融资主要用于中试线建设，并继续进行更大尺寸、更高效率、更长寿命的产品研发。

■ 钙钛矿电池发展受国家政策支持。近两年相关政策陆续出台，为钙钛矿电池产业化发展提供有力支持。在2022年10月发布的《关于促进光伏产业链健康发展有关事项的通知》中提出突破高效晶体硅电池、高效钙钛矿电池等低成本产业化技术。

图表：2022年钙钛矿主要公司融资情况

| 公司   | 融资轮数   | 金额    | 主要投资企业                                |
|------|--------|-------|---------------------------------------|
| 纤纳光电 | D轮     | -     | 招银国际、杭开集团                             |
| 协鑫光电 | B+轮    | 5亿    | 淡马锡投资、红杉中国、IDG资本、川流投资                 |
| 极电光能 | Pre A轮 | 2.2亿  | 碧桂园创投、九智资本、建银国际、云林基金、稳晟科技             |
| 仁烁光能 | Pre-A轮 | 数亿元   | 三行资本、中科创星、苏高新创投、金浦智能、险峰长青、云启资本、中财产业基金 |
| 无限光能 | 天使轮    | 数千万元  | 耀途资本、光跃投资、碧桂园创投                       |
| 光晶能源 | 天使轮    | 3000万 | 正轩投资、创新工场、鼎祥资本                        |
| 脉络能源 | 天使轮    | 数千万元  | 国新思创、凡创资本、国华三新、高捷资本                   |
| 众能光电 | -      | -     | 华夏恒天资本                                |
| 曜能科技 | A轮     | 数千万元  | 高瓴资本                                  |

图表：中国钙钛矿电池行业政策

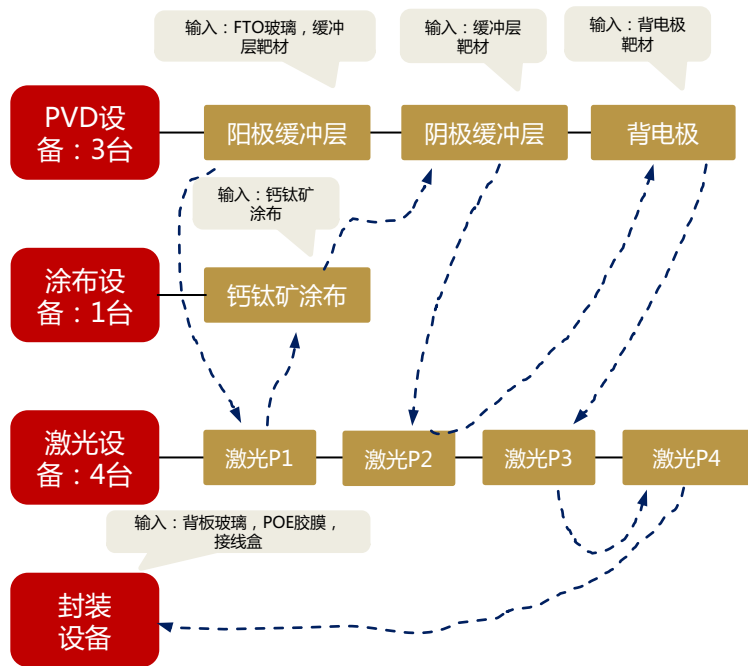
| 发布时间     | 政策名称                         | 内容                                                                |
|----------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 2023年1月  | 《推动能源电子产业发展的指导意见》            | 发展先进高效的光伏产品及技术，推动N型电池、柔性薄膜电池、钙钛矿及叠层电池等先进技术研发应用，提升规模化量产能力          |
| 2022年10月 | 《关于促进光伏产业链健康发展有关事项的通知》       | 完善产业链综合支持措施，落实相关规划部署，突破高效晶体硅电池、高效钙钛矿电池等低成本产业化技术，推动光伏发电降本增效        |
| 2022年8月  | 《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022-2030年）》 | 研发高效硅基光伏电池、高效稳定钙钛矿电池等技术，进一步突破一批碳中和前沿和颠覆性技术研发高效轨迹光伏电池、高效稳定钙钛矿电池等技术 |
| 2022年8月  | 《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划》         | 推动TOPCon、HJT、IBC等晶体硅太阳能电池技术和钙钛矿、叠层电池组件技术产业化，开展智能光伏试点示范和行业应用       |
| 2022年6月  | 《“十四五”可再生能源发展规划》             | 开展新型高效晶硅电池、钙钛矿电池等先进高效电池技术应用示范，研发大面积、高效率、高稳定性的钙钛矿电池                |



## 二、钙钛矿电池：工艺与设备

- 钙钛矿光伏电池的制备中，ETL、HTL与钙钛矿吸光层是制备工艺中的核心环节。其中，钙钛矿吸光层的制备是最核心的环节。封装是钙钛矿光伏组件生产与晶硅光伏组件生产中相同，而涂布是钙钛矿光伏电池生产中独有的环节，主要用于钙钛矿层的制备。

图表：协鑫100MW生产流程及工艺设备



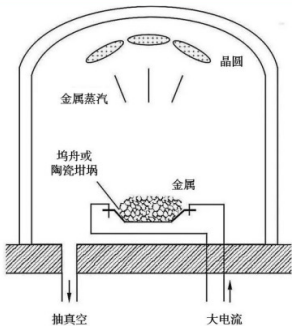
- **钙钛矿层**：高效钙钛矿电池的首要条件是钙钛矿吸收层形貌，均匀度，结晶度，覆盖度，晶粒尺寸和晶粒取向质量均较高。对于钙钛矿薄膜的大面积制备技术，如何控制大面积薄膜均匀性（厚度约500nm）和降低薄膜的缺陷密度仍然是一个挑战。目前主要集中于MAPbI<sub>3</sub>钙钛矿的研究，大面积通常采用狭缝涂布工艺。
- **空穴传输层（HTL）**：第一类是无机物和有机金属化合物（有氧化铜，碘化亚铜，氧化镍（NiO）和硫氰化铜(CuSCN)）、一类是聚合物（如PSS、PTAA等）。若是氧化镍，通常用喷涂、喷雾热解制备或者用PVD法制备。若选择PTAA等有机物，采用刮涂或是喷雾热解制备。
- **电子传输层（ETL）**：若为有机材料通常采用蒸镀工艺，若为金属氧化物，通常采用气象沉积工艺如PVD或RPD设备、材料包括TiO<sub>2</sub>、ZnO、SnO<sub>2</sub>、WO<sub>x</sub>、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、富勒烯及其衍生物等。
- **非金属电极**：非金属电极是透明导电氧化层（TCO），通常使用ITO和FTO。FTO可以耐500°高温，主要用于烧结TiO<sub>2</sub>的场合，比如介孔层，采用TiO<sub>2</sub>作为电子传输层的器件。ITO的透光性和导电性优于FTO，但不耐高温，通常用于低温和柔性器件。通常采用PVD磁控溅射制备。
- **背电极**：包括金属电极和碳电极。金属电极通常采用真空蒸镀、磁控溅射镀制备；碳电极通常采用涂布法。

- 电子传输层与空穴传输层均存在较多工艺路径，主要包括PVD（包括蒸镀和磁控溅射）、反应等离子沉淀（RPD）两种工艺。
- 蒸镀：真空蒸镀工艺是指在装有基片的真空室抽成真空，加热镀膜料使其原子或分子从表面气化逸出形成蒸气，入射至基片表面，凝结形成固态薄膜。该工艺可实现大面积均匀沉积薄膜，且稳定性好、良率高，在学界中被认为是可用于规模化生产钙钛矿电池的工艺。
- 磁控溅射：应用于TCO、电子传输层、空穴传输层的制备。可实现精准把握薄膜厚度，但成本高。
- 反应等离子沉淀（RPD）：利用等离子体枪产生氧的等离子体，使其进入生长腔后在磁场作用下轰击靶材，温度升高后生化形成蒸汽实现薄膜沉积，沉积效果类似于蒸镀。该方式可镀凹槽、狭缝等复杂结构，镀层均匀性好，质量高。

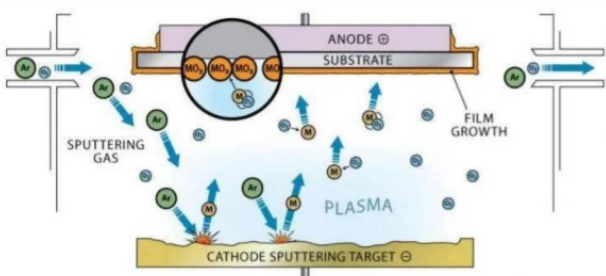
图表：三种真空镀膜方式对比

|      | 蒸镀                   | 磁控溅射                    | 离子镀-RPD         |
|------|----------------------|-------------------------|-----------------|
| 成膜速度 | 更高                   | 高                       | 更高              |
| 成膜质量 | 纯度高，沉底可选范厚可控，重复性好，围广 | 成膜质量更高，对沉底的轰击损伤比PVD小    |                 |
| 制程温度 | 高温                   | 低温                      | 低温              |
| 真空要求 | 更高                   | 高                       | 高               |
| 制程控制 | 一般                   | 高                       | 更高              |
| 设备成本 | 高                    | 高                       | 更高              |
| 技术成熟 | 更成熟                  | 成熟                      | 日本专利，捷佳引进       |
| 劣势   | 薄膜附着力一般              | 薄膜中间厚四边薄                | 靶材利用率一般         |
| 场景   | 金属电极                 | 制备反式空穴传输层/正式电子传输层和透明导电层 | 正式空穴传输层/反式电子传输层 |

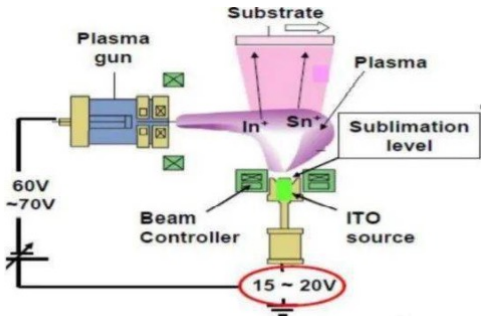
图表：真空镀膜示意图



图表：磁控溅射示意图



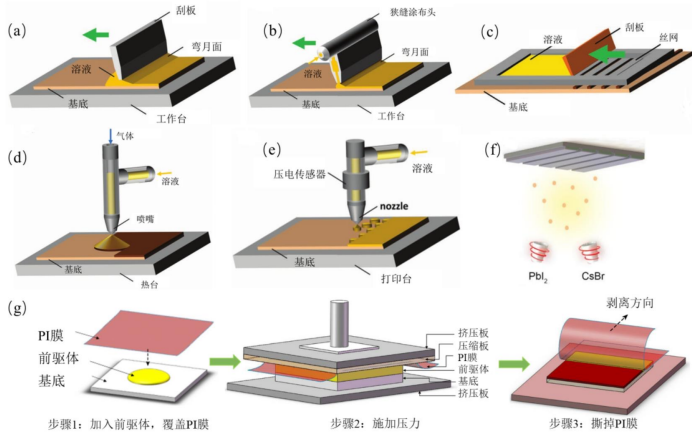
图表：反应等离子沉淀示意图





- 钙钛矿吸光层是光收集层，产生电子-空穴对。
- 钙钛矿电池的光电转换效率和薄膜的光电特性受薄膜形貌的影响很大。
- 多种成膜方法不断被开发用于制备高效的钙钛矿薄膜，常见的钙钛矿薄膜制备方法包括一步法、两步法、双源共蒸发法、气相辅助溶液法、刮涂法、卷对卷印刷技术、喷墨打印、狭缝涂布等。

图表：常见的钙钛矿薄膜制备工艺示意图



a) 刮涂法；b) 狭缝涂布法；c) 丝网印刷；d) 喷涂；e) 喷墨打印；f) 双源共蒸发法；g) 软膜覆盖法

图表：纯钙钛矿薄膜制备方法

| 制备方法    |         | 概述                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 旋涂法     | 一步法     | 现在比较常用的钙钛矿薄膜的制备方法。通常是将 $PbX_2$ 和 $CH_3CH_3X$ ( $X$ 为 $Cl$ 、 $Br$ 、 $I$ ) 按固定的物质的量比加入到高沸点的极性溶剂（如 $N$ ， $N$ - 二甲基甲酰胺（ $DMF$ ）、 $\gamma$ - 丁内酯（ $GBL$ ）、二甲亚砜（ $DMSO$ ）等）中，将混合物在一定的温度范围内加热搅拌，以制成澄清的钙钛矿前驱体溶液。然后将溶液旋涂在衬底上，经过退火处理获得所需的钙钛矿薄膜。 |
|         | 两步法     | 将生成钙钛矿的两种前驱体的旋涂过程分为两步进行。先将 $PbX_2$ 加入 $DMF$ 或 $DMSO$ 等高沸点极性溶剂中，然后将溶液旋涂在基底上制成 $PbX_2$ 薄膜；进而将制备的 $PbI_2$ 薄膜浸入 $MAI$ 或 $FAI$ 的异丙醇溶液中，或者在 $PbI_2$ 薄膜上旋涂 $MAI$ 或 $FAI$ 的异丙醇溶液，使二者反应制备得到钙钛矿薄膜。                                              |
| 气相沉淀法   | 双源共蒸发法  | 是沉积薄膜的一种常用方法，使用双气源共蒸发同时对 $PbX_2$ 和 $CH_3CH_3X$ 进行加热蒸发，在真空条件下使其在衬底上沉积，然后加热使其反应形成钙钛矿薄膜。在双源共蒸发中，可以通过控制两种固体的蒸发速率，改变两种成分的比例，进而控制钙钛矿的成分组成，获得均一度较高的钙钛矿薄膜。                                                                                    |
|         | 气相辅助溶液法 | 将旋涂了 $PbX_2$ 的薄膜作为钙钛矿前驱体置于 $CH_3CH_3X$ 气氛中，使它们相互结合形成钙钛矿薄膜。                                                                                                                                                                            |
| 刮涂法     |         | 一种工艺简单的薄膜制备方法，先在导电基底上刮涂电子传输层的前驱溶液并退火，重复一次上述操作，再在电子传输层上刮涂一层前驱溶液并退火得到钙钛矿层，然后刮涂空穴传输层溶液，静置干燥得到空穴传输层，最后制备背电极，得到钙钛矿太阳能电池。                                                                                                                   |
| 喷墨打印    |         | 喷墨打印是一种非接触式材料保护可扩展打印技术，可以实现尺寸的精确可控与沉积的自动可重复，其原理是基于精确的液滴操作将油墨从喷嘴喷射到衬底。                                                                                                                                                                 |
| 卷对卷印刷技术 |         | 卷对卷印刷技术是在环境条件下高集成、低成本、大规模制备柔性钙钛矿太阳能电池的一种很有前景的制备工艺。                                                                                                                                                                                    |

- 涂布应用较广，包括刮涂、线棒、狭缝涂布等。在大面积钙钛矿产业化进程中，目前多采用狭缝涂布技术。狭缝涂布工艺可见于锂电池、燃料电池、液晶显示等多领域的精密制造环节。狭缝涂布可兼容卷对卷生产，是实现钙钛矿电池产业化的重要方法。
- 涂布产品壁垒主要在于机械精度（平面度、直线度、粗糙度等）、涂布效率（宽度、速度等）和涂布效果（面密度、尺寸、外观等）等技术指标，对模头与流道协同的可视化调节方式、多种浆料和绝缘涂料共同涂布的流道腔体设计、基于神经网络及卡尔曼滤波算法实现涂布面密度自动调节的闭环控制系统等技术要求较高。
- 从应用领域来看：不同领域不同应用场景涂布模头设计需要考虑的因素有显著区别。
- 从机械精度来看：钙钛矿电池和薄膜晶体管涂布相当。

图表：（狭缝）涂布的机械精度

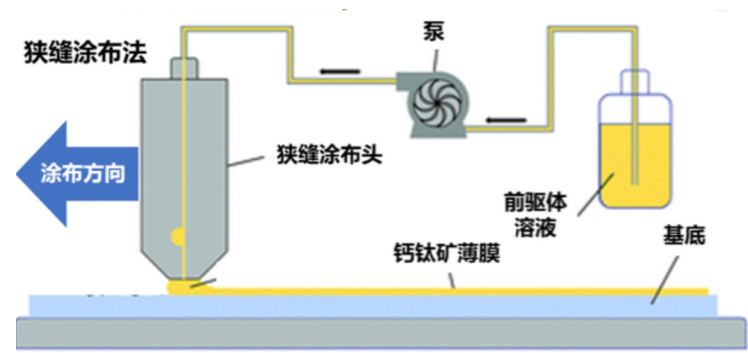
| 项目        | 锂离子电池    | 燃料电池      | 太阳能电池    | 液晶显示     | 半导体先进封装    |
|-----------|----------|-----------|----------|----------|------------|
|           | 正负极极片涂布  | 氢燃料电池电极涂布 | 钙钛矿电池    | 薄膜晶体管涂布  | 面板级扇出型封装涂布 |
| 涂布宽度（mm）  | 500-1600 | 200-350   | 320-1950 | 320-2940 | 300-600    |
| 平面度要求（μm） | ≤5μm     | ≤1μm      | ≤3μm     | ≤3μm     | ≤1μm       |
| 直线度要求（μm） | ≤5μm     | ≤1μm      | ≤3μm     | ≤3μm     | ≤1μm       |
| 表面粗糙度     | ≤Ra0.025 | ≤Ra0.01   | ≤Ra0.01  | ≤Ra0.01  | ≤Ra0.01    |
| 关键尺寸公差    | IT0-IT1  | IT0       | IT0-IT1  | IT0-IT1  | IT0        |
| 其他关键形位公差  | 1-2级     | 1-2级      | 1-2级     | 1-2级     | 1-2级       |

图表：（狭缝）涂布的应用场景

| 项目             | 锂离子电池      | 燃料电池      | 太阳能电池    | 液晶显示     | 半导体先进封装    |
|----------------|------------|-----------|----------|----------|------------|
|                | 正负极极片涂布    | 氢燃料电池电极涂布 | 钙钛矿电池    | 薄膜晶体管涂布  | 面板级扇出型封装涂布 |
| 基材             | 卷材类        | 卷材类       | 平板类      | 平板类      | 平板类        |
| 基材平整度          | 优          | 优         | 良        | 良        | 良          |
| 安装方式           | 水平居多       | 水平居多      | 竖直向下     | 竖直向下     | 竖直向下       |
| 恒温要求           | 中          | 稍严        | 稍严       | 严格       | 苛刻         |
| 粉尘要求           | 中          | 稍严        | 稍严       | 严格       | 苛刻         |
| 气泡要求           | 中          | 严格        | 严格       | 严格       | 苛刻         |
| 异物要求           | 中          | 严格        | 严格       | 严格       | 苛刻         |
| 涂层均匀性          | 严格         | 严格        | 严格       | 严格       | 严格         |
| 涂布方式           | 连续/间接      | 连续/间接     | 每片       | 每片       | 每片         |
| 共挤涂层           | 有          | 无         | 无        | 无        | 无          |
| 磨损要求           | 高          | 一般        | 一般       | 一般       | 一般         |
| 耐腐要求           | 化学腐蚀/电化学腐蚀 | 化学腐蚀      | 化学腐蚀     | 化学腐蚀     | 化学腐蚀       |
| 涂布速度（目前，m/min） | 10-120     | 1-10      | 10-50    | 50-200   | 10-50      |
| 涂布宽度（目前，mm）    | 500-1600   | 200-350   | 320-1950 | 320-2940 | 300-600    |
| 流体特征           | 非牛顿流体      | 非牛顿流体     | 非牛顿流体    | 非牛顿流体    | 非牛顿流体      |
| 流体种类           | 很多         | 较少        | 较少       | 多        | 较少         |
| 涂层厚度（干磨，μm）    | 40-150     | 5-15      | 0.5-1.5  | 1-10     | 5-80       |

- **高精密狭缝式涂布模头是涂布技术在各个新兴技术领域应用发展而逐步兴起的产品。**高精密狭缝式涂布模头是涂布机的最核心部件，目前以进口为主，国内曼恩斯特等企业逐步实现进口替代。狭缝涂布法可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，相对其他涂布工艺更容易控制。同时，狭缝涂布法可将溶液密封在储液罐中，既能够提高溶液利用率，又能够保障溶液浓度的统一和减少对操作人员的影响。
- **狭缝涂布技术工作原理：**涂布液在一定压力一定流量下沿着涂布模具缝隙挤压喷出转移至基材上。
- **狭缝涂布设备的优点：**1) 涂布速度快、精度高、湿厚均匀、易控制；2) 涂布系统封闭，在涂布过程中可防止污染物进入；3) 浆料利用率高，可保持浆料性质稳定，可同时进行多层涂布；4) 适应范围广，可适应不同浆料黏度和固含量范围；5) 高可靠性，大批量生产良率达95%。
- **头部厂商皆在搭建MW级别的中试线，钙钛矿层的涂布结晶工艺的不成熟是目前制约钙钛矿光伏电池量产的主要因素。**钙钛矿薄膜的结晶性良好有助于降低其缺陷态密度、减少载流子的复合。大面积钙钛矿的主要难点就是如何在溶液中形成大量的结晶，以提升镀膜的均匀性。目前用于制备大面积钙钛矿薄膜的涂布工艺主要为风刀吹气辅助狭缝涂布工艺。

图表：狭缝涂布示意图



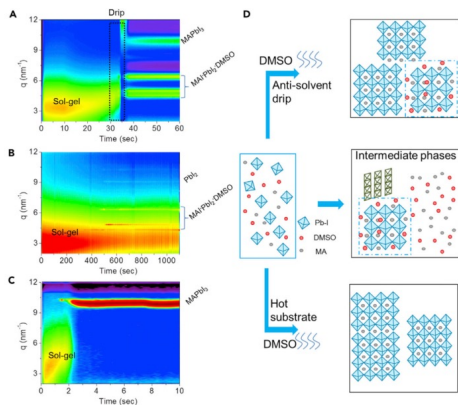
图表：大面积钙钛矿薄膜制备技术对比

| 制备方式  | 优势              | 缺点                   |
|-------|-----------------|----------------------|
| 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较差  |
| 狭缝涂布法 | 易于大面积制备，成产效率高   | 对设备精确度要求高            |
| 丝网印刷法 | 易于大面积制备，涂覆过程简单  | 利用率低，对丝网精度要求高        |
| 喷涂法   | 易于大面积制备，喷涂过程简单  | 溶液利用率低，可重复性差         |
| 喷墨打印法 | 材料利用率高，可实现定制化生产 | 设备要求高，生产效率低，难以控制结晶过程 |
| 软膜法   | 可大面积制备，无需溶液     | 材料利用率低，生产效率低         |
| 气相沉淀法 | 薄膜质量较高，可精准调控    | 生产效率低，成本高            |

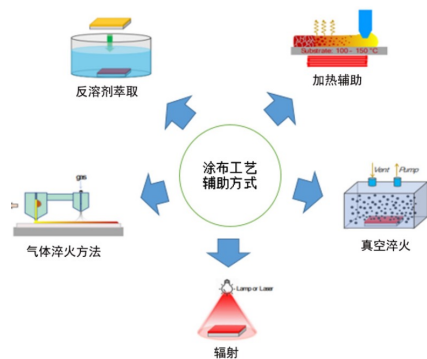
资料来源：《钙钛矿太阳能电池稳定性研究进展及模组产业化趋势》（金胜利等），曼恩斯特招股书，湘潭大学学报，上海德沪官网，华西证券研究所

- **钙钛矿电池的光电性能在很大程度上取决于钙钛矿吸收层的晶体形态**，特别是大面积钙钛矿电池上涂覆均匀且没有针孔的钙钛矿薄膜，**结晶性良好有助于降低其缺陷态密度、减少载流子的复合**。大面积钙钛矿的主要难点就是如何在溶液中形成大量的结晶，控制凝结核的生成速度，以提升镀膜的均匀性。在没有精细控制结晶过程的情况下，会倾向于向树枝状结构生长的趋势，而导致的钙钛矿膜表面出现表面覆盖不完全，会产生漏电对器件性能有害。
- **结晶过程调控方法**，包括加热辅助、反溶剂萃取、吹气法（气体淬火）、真空淬火和辐射。相关设备，包括VCD/HVCD、风刀、隧道炉、HP/CP、IR、原位加热设备等。上述技术依赖于前体溶剂的快速去除，从而使溶液快速达到过饱和。另外，钙钛矿薄膜生长与成核和晶体生长以及前驱体的溶液化学组分均密切相关。大量研究表明，钙钛矿薄膜的晶体形态可以通过引入添加剂如硫氰酸盐离子、氯离子等来调节。
- **目前用于制备大面积钙钛矿薄膜的涂布工艺主要为风刀吹气辅助狭缝涂布工艺**。吹气法通过在薄膜表面快速的气体流动，不断将溶剂蒸汽去除以实现快速干燥，由于其无化学溶剂以及低温的特点，可能相较于其他几种方法更能保证成膜的一致性。

### 图表：薄膜的结晶



### 图表：涂布工艺辅助方式示意图



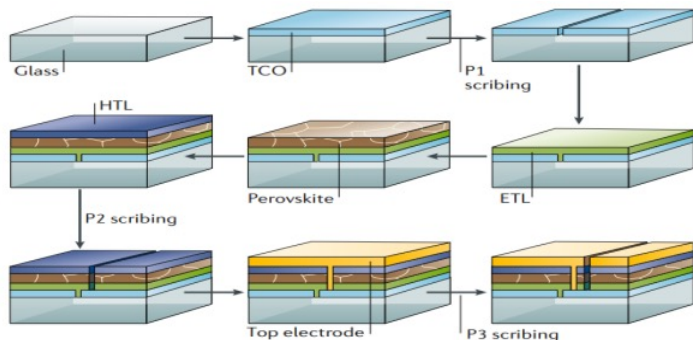
### 图表：涂布工艺辅助方式

| 方法    | 具体过程                                                                                                       |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 反溶剂萃取 | 在该过程中, 过饱和状态突然消失, 形成过饱和状态, 使钙钛矿晶核析出                                                                        |
| 气体淬火  | 具有良好的可重复性, 避免使用化学药品, 是一个低温过程。流动气体从表面上的湿涂层带走溶剂, 留下钙钛矿材料以形成固体膜                                               |
| 真空淬火  | 依赖于压力的变化, 以去除溶剂并通过达到过饱和而引发成核。与反溶剂萃取和气体淬火相似, 真空淬火的一个明显优势是前驱体溶液沉积和热诱导结晶可以有效地分离                               |
| 辐射    | 是一种快速、无接触的加热目标材料的方式, 该方法不仅使光子能量能够有效地吸收到吸收层中, 而且还能够吸收到下面的透明导电层。与耗能高的热处理相反, 辐照退火由于其处理时间短和能源利用效率高, 可以大大降低制造成本 |
| 加热辅助  | 是一种简单的方法促进溶剂蒸发和钙钛矿结晶成核                                                                                     |

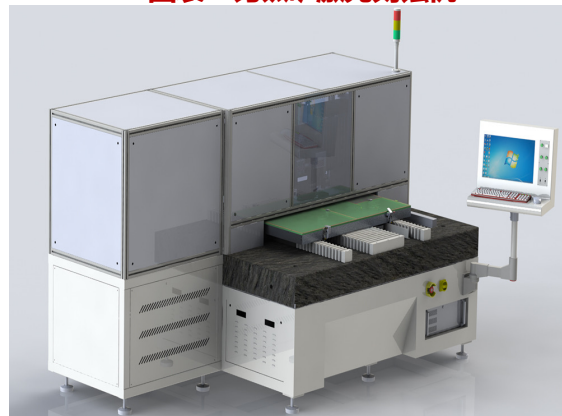


- **在刻蚀环节中，有机械刻蚀、金刚线刻蚀、激光刻蚀等方法，其中激光刻蚀已成为主流方法。**激光刻蚀具有成本低、精度高、死区小、效率高等优势。该方法是通过激光划线打开膜层，阻断导通形成单独模块，获得子电池。主要有包括四次激光刻蚀，P1-P3为平行激光划线，主要未来串联；P4为激光清边，主要为了封装。
- **P1激光划线：**在透明导电氧化物沉积后，电子传输层沉积前进行激光刻蚀，形成独立的条形导电电极。
- **P2激光划线：**在电子传输层与空穴传输层沉积后，背面透明电极沉积前进行激光刻蚀，形成空缝，待背面透明电极沉积时填满空缝，连接电池底电极和另一个子电池的透明顶电极。
- **P3激光划线：**去除相邻的底电极、空穴传输层、电子传输层等，仅留TCO层，实现分离。该过程需保证激光刻蚀线宽度和刻蚀线间距的精确度，不破坏原有层级。
- **P4激光清边：**利用激光划分出区域，对电池边缘进行绝缘处理，去除薄膜的无效区域。

图表：激光刻蚀流程图



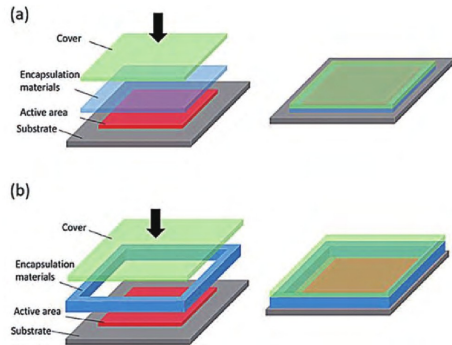
图表：钙钛矿激光刻蚀机



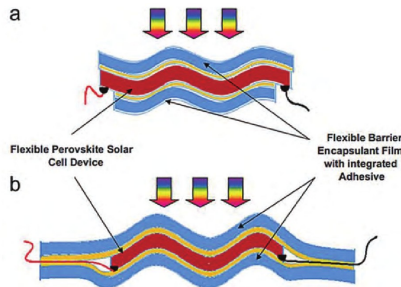


- **目前钙钛矿太阳能电池有两种常见的电池封装技术。**1) 第一代封装技术：通过使用蒸发金属喷射器和焊接金属将电流从电池传导到外部，并密封金属带的边缘，位置位于封闭空腔的中心；2) 第二代封装技术：使用透明的氧化铟锡电极将钙钛矿电极与金属电极分开，以保证电极与印刷电路板之间有一定的横向间隙。封装的一面是ITO电极，更好的密封整个器件。根据封装工艺分类，薄膜封装大概可分为：玻璃-聚合物薄膜封装、原子沉积薄膜（ALD）封装、复合薄膜封装等。
- **封装材料：**常见材料有聚异丁烯、聚乙烯、热塑性聚氨酯、乙烯醋酸乙烯酯、环化全氟聚合物。
- **封装所使用的聚合物材料需具备如下特性：**1) 良好的绝缘性，有效隔离空气中的水和氧；2) 热塑性；3) 一定的机械强度；4) 化学惰性，在封装过程中与钙钛矿器件直接接触，不会破坏钙钛矿电池器件、材料等；5) 成本低且已加工，可实现低成本大面积包装。
- **钙钛矿电池中封装胶膜一般使用POE胶膜，而非EVA胶膜，再用丁基胶封边，同时使用真空热层压工艺（和晶硅组件相同）。**钙钛矿材料较为敏感，因此封装要求比晶硅电池更高。主要原因有：1) EVA胶膜的水汽透过率高；2) EVA胶膜降解分解会产生醋酸，会与钙钛矿产生组分反应，对钙钛矿材料造成腐蚀，降低电池性能。

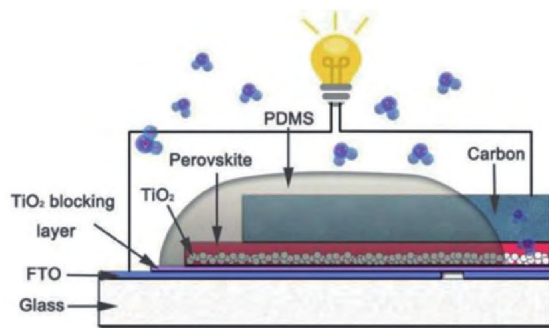
图表：两种封装方式示意图



图表：部分及完全封装结构



图表：封装设备示意图





### 三、钙钛矿电池：产业链分析

图表：钙钛矿产业链及相关公司（不完全统计）



# 钙钛矿：中上游设备厂商布局概览

图表：中国本土企业钙钛矿设备进展

| 厂商名称       | 设备                                      | 进度                                                                                                                                                                  |
|------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 上海德沪涂膜     | 精密狭缝涂膜设备                                | 2021年全球首套用于大面积钙钛矿太阳能面板制造核心涂膜设备系统验收成功是国内首个超越日、德、韩国厂商可提供高品质量产电子级精密狭缝涂布设备的本土公司。我国已建和在建的500MW试量产线核心涂膜设备供货中，德沪涂膜狭缝涂布设备0.6m×1.2m和1m×2m供货达350MW，市占率70%。                    |
| 弗斯迈        | 钙钛矿整线                                   | 弗斯迈技术团队研发设计的全智能自动化产线，整线运行平稳，控制精准。2021年弗斯迈与钙钛矿电池组件龙头工厂达成合作，进一步降低钙钛矿太阳能电池的成本。                                                                                         |
| 众能光电       | 钙钛矿整线、刮涂/涂布一体机、磁控溅射仪、蒸镀机激光划线刻蚀机、封装和测试装备 | 截至2021年年底，众能光电已对外销售 <b>刮涂/涂布一体机、磁控溅射、热蒸发镀膜、ALD和激光刻蚀机等</b> 工艺单机以及光伏组件整线近100台套。                                                                                       |
| 捷佳伟创       | 狭缝涂布、PVD/RPD、蒸发镀膜、钙钛矿及叠层电池整线（研发中）       | 2022年首套量产型钙钛矿电池核心装备 <b>RPD</b> 通过厂内验收。2022年获钙钛矿 <b>低温低损薄膜真空沉积设备</b> 订单、 <b>反应式等离子镀膜设备</b> 订单、钙钛矿 <b>共蒸法真空镀膜设备</b> 订单以及某全球头部光伏企业钙钛矿电池蒸镀设备项目。2022年下半年至今，钙钛矿设备订单超过2亿元。 |
| 迈为股份       | 激光设备                                    | 2020年年报披露公司已布局钙钛矿 <b>激光设备</b> 。主要内容是研究对钙钛矿型太阳能电池组件的切割工艺，分割标准件成电池，让电池形成串联，到达绝缘和可靠性的处理                                                                                |
| 晟成光伏（京山轻机） | ITO玻璃清洗、PVD、蒸镀机、ALD（在研）                 | 2021年，晟成光伏与协鑫光电签约共同研发钙钛矿叠层电池技术。2022年， <b>团簇型多腔式蒸镀设备</b> 完成量产交付，并成功应用于多个客户端，已具备成熟供货能力。公司在钙钛矿镀膜设备布局了三个技术方向，主要是 <b>溅射式设备、蒸镀设备、ALD设备</b> ，另外，公司层压机设备可用于钙钛矿电池的封装环节。      |
| 德龙激光       | 激光设备                                    | 目前已推出针对钙钛矿薄膜太阳能电池生产 <b>激光设备</b> ，目前已投入客户量产线使用，率先实现百兆瓦级规模化量产                                                                                                         |
| 曼恩斯特       | 涂布模头                                    | 在锂电涂布模头领域，公司在 2020 年中国新增产品市场占有率排名行业第三（按品牌排名）。在 <b>钙钛矿领域，公司产品终端客户为杭州纤纳光电科技有限公司</b>                                                                                   |
| 帝尔激光       | 激光设备                                    | 在钙钛矿电池上有 <b>全新激光技术</b> 覆盖，已经完成了钙钛矿电池量产订单的交付。                                                                                                                        |
| 奥来德        | 蒸镀机                                     | 依托其蒸镀技术闯入钙钛矿赛道，预计使用4900万元投资建设钙钛矿结构型太阳电池蒸镀设备的开发项目和低成本有机钙钛矿载流子传输材料和长寿命器件开发项目。                                                                                         |
| 科恒股份       | 平板涂布设备                                  | 2021年7月初开始和合作方共同研发钙钛矿平板涂布设备，于2022年7月出货进行安装调试。                                                                                                                       |
| 大族激光       | 钙钛矿激光刻划设备                               | 钙钛矿激光刻划设备已实现量产销售，大尺寸整线激光刻划设备已在钙钛矿头部企业交付。                                                                                                                            |
| 杰普特        | 激光精密加工设备                                | 公司于2021年8月交付首套柔性钙钛矿模切设备，开发了全新一代钙钛矿模切设备和清边设备，包含了P1-P3的划线及P4的清边工艺流程。                                                                                                  |

■ 钙钛矿尚处起步阶段，众多企业持续关注和布局。

图表：部分上市公司布局进展

| 公司名称 | 布局或进展                                                        |
|------|--------------------------------------------------------------|
| 天合光能 | 聚焦高效N型TOPCon/钙钛矿叠层电池，承担国家重点研发计划项目的研究不断提升叠层电池转换效率以实现新突破       |
| 东方日升 | 进一步提高高效钙钛矿叠层电池的转换效率                                          |
| 晶科能源 | 推动钙钛矿电池技术从实验室研究到未来产品量产工艺方案的开发。通过大面积高效高稳定钙钛矿电池开发，推动钙钛矿电池走向商业化 |
| 隆基股份 | 对钙钛矿等新型电池技术保持密切的跟踪和关注                                        |
| 宁德时代 | 钙钛矿光伏电池研究进展顺利，正在搭建中试线                                        |
| 聆达股份 | 关注钙钛矿电池技术的发展，并把异质结叠加钙钛矿技术列入三期规划                              |

图表：部分非上市公司布局进展

| 公司名称 | 规划产能  | 投资额    | 产线                                                                                             |
|------|-------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 大正微纳 | 100MW | /      | 自研高精密涂布狭缝设备；已搭建10MW柔性钙钛矿光伏组件产线2022年7月正式量产，2023年3月建设百MW级钙钛矿电池产线                                 |
| 曜能科技 | /     | /      | 中关村通州园选址，2022下半年开始建设中试车间，2023年底投入使用                                                            |
| 极电光能 | 6GW   | 50亿元   | 150MW于2022Q4正式投产运行，计划在2023建设一期1GW，2024、2025分别追加2GW和3GW的产能；总投资超30亿元的GW级钙钛矿光伏生产线及配套产线将于2023年启动建设 |
| 协鑫光电 | 10GW  | /      | 100MW产线处于工艺开发和设备改造阶段，100MW产能达到设计要求后，将开建1GW产线，然后放大到5-10GW                                       |
| 万度光能 | 10GW  | 60亿元   | 计划一期建设200MW级可印刷介观钙钛矿太阳能电池大试线正式落地，顺利量产扩充至10GW产能                                                 |
| 仁烁光能 | 160MW | /      | 10MW钙钛矿叠层中试线正式投产；150MW钙矿组件量产线已完成设计工作                                                           |
| 无限光能 | 100MW | /      | 10MW试验线已于2022年底建成，100MW中试线的深化设计和设备采购正在进行中                                                      |
| 纤纳光电 | 5GW   | 54.6亿元 | 一期100MW级别产线2022年5月量产，7月出货，预计2024年有GW级项目规划落地                                                    |



- **公司介绍：**协鑫光电成立于2019年，经营目标为提供可实现光伏发电平价上网的太阳能电池板，使清洁能源成为能源市场的主流。公司专注于钙钛矿太阳能组件的研发、生产，为市场提供1mx2m尺寸的太阳能组件，并依托现有的110MW（100MW+10MW）的中试产线，不断提高钙钛矿电池的光电转化效率，降低太阳能电池的成本。
- **协鑫光电团队研发能力强。**公司通过采用自主研发的大面积钙钛矿Slot-die涂布方法，辅以大面积钙钛矿溶液结晶成膜技术和先进的内联集成技术，可批量生产具有商业化价值的产品，目前产品效率超15%，下线组件转化效率近16%，预计在2023年底之前超过18%。在同类产品中处于较高水平。

图表：协鑫光电100MW产线



图表：协鑫光电钙钛矿布局情况

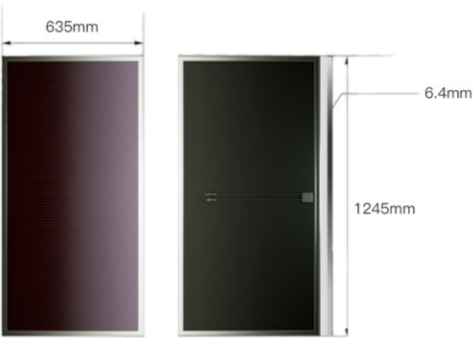
| 时间       | 事件                                                               |
|----------|------------------------------------------------------------------|
| 2015年    | 厦门惟华光能有限公司（2016年底被协鑫集团并购）率先建成一条钙钛矿光伏组件中试产线，产品尺寸为45cm×65cm，背电极为碳浆 |
| 2017年10月 | 协鑫纳米投资7000万元，在苏州建成业界先进10MW级别45cm×65cm钙钛矿光伏组件中试生产线                |
| 2019年初   | 协鑫纳米10MW级中试线生产工艺开发基本完成                                           |
| 2019年11月 | 协鑫纳米钙钛矿组件率先获得TUV认证，面积为1241.16cm <sup>2</sup> ，转化率为15.31%         |
| 2020年底   | 成立协鑫光电，融资约2亿元，开始筹建100MW量产生产线                                     |
| 2021年中旬  | 完成100MW量产生产线并进行试生产                                               |

- **公司介绍：**纤纳光电是全球知名的该条款光伏技术领军企业，目前全球首家且唯一的实现第三代钙钛矿光伏组件量产的公司。公司已累计申报300+项知识产权专利，先后7次刷新钙钛矿太阳能组件光电转换效率的记录。目前在浙江衢州建有国内首个钙钛矿产业基地，2022年初建成全球首条百兆瓦级钙钛矿规模化产线并已投产，2022年年5月率先发布全球首款钙钛矿商用组件α，7月首批α组件正式出货。
- **现有产品：**1) 钙钛商用组件α，尺寸为1245\*635\*6.4mm；2) 半透明组件α，产品透光度可调，吸收峰值可调；3) 彩蝶BIPV系列，满足用户颜色、图案、规格等个性化定制；4) 地面电站，根据地形条件、开发要求及安装方式为客户提供多元化定制方案，如α组件方案、α+传统组件方案等。
- **产品稳定性持续突破：**公司产品稳定性突破主要有两个阶段。第一阶段为公司中试级组件IEC稳定性核心项目获认证，第二阶段为通过百兆瓦级量产钙钛矿商用组件稳定性认证。目前纤纳光电已进入第二阶段，成为全球首个、且目前唯一完整通过IEC61215、IEC61730稳定性全体系测试的钙钛矿机构，为钙钛矿大规模商业化应用铺平道路。

图表：纤纳产品稳定性突破相关事件

| 时间       | 事件                                 |
|----------|------------------------------------|
| 2019年12月 | 首次通过湿热、温度循环、UV老化及光老化测试4项IEC稳定性核心认证 |
| 2021年2月  | 通过钙钛矿组件稳定性多倍加严测试                   |
| 2023年1月  | 纤纳α组件通过IEC1215、IEC61730稳定性全体系认证    |

图表：纤纳光电钙钛矿商用组件α



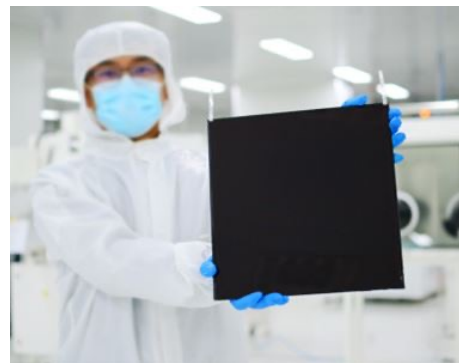
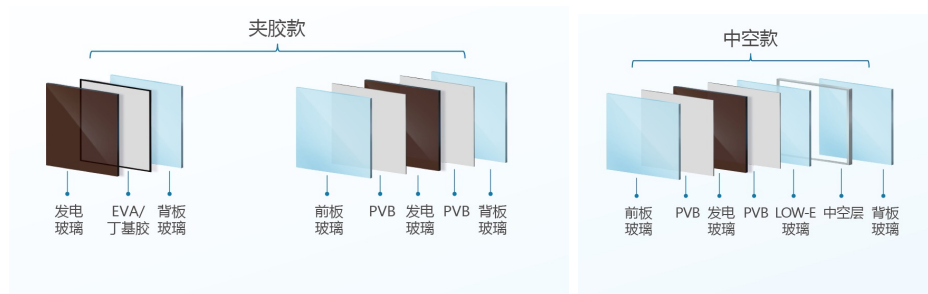
图表：纤纳钙钛矿商用组件α特点

| 优势     | 具体描述                                                  |
|--------|-------------------------------------------------------|
| 高经济性   | 组件具有高功率、高收益和高减排特性。由于钙钛矿成本低，单位面积发电量高，制备过程低碳节能，因此具有高经济性 |
| 稳定耐用   | 开启12年产品材料与工艺质保和25年线性功率输出质保的产品体验                       |
| 优异光电性能 | 具有系统效率高、弱光效应好、热斑效应小、无隐裂风险的优势                          |

- **公司介绍：**极电光能是一家专业从事钙钛矿光伏、钙钛矿光电产品研发和制造的创新型高科技企业。公司于2018年开始钙钛矿技术研发，2020年4月于无锡落地，目前在钙钛矿技术研发和产业化方面均处于行业领先地位。目前公司在产品稳定性、大面积制备、钙钛矿光伏组件核心技术方面，具有行业前瞻性的技术并持续突破。目前公司拥有150余项核心专利，发明专利占80%以上。
- **150MW钙钛矿光伏生产线正式投产，年产值全球领先：**极电光能150MW钙钛矿光伏生产线正式投产运行，标志着极电光能从实验室研发迈向全面产业化发展。该产线是全球规模最大、产能最大且已投产的钙钛矿光伏生产线，同时具备BIPV产品和标准组件的生产能力。预计后续将陆续向市场推出发电石材、透明发电幕墙、光伏屋瓦等高性能钙钛矿BIPV产品，年产值预计将达3亿元。未来极电光能预计将斥资30亿元建设全球首条GW级钙钛矿光伏组件及BIPV产品生产线、100吨钙钛矿量子点生产线等。
- **组件效率不断提升：**2021年极电光能在自主研发的64cm<sup>2</sup>的钙钛矿光伏组件上取得20.5%的转换效率；2022年4月在300cm<sup>2</sup>的大尺寸钙钛矿光伏组件上实现18.2%的光电转换率，多次创造世界纪录。目前，该公司研发的钙钛矿光伏组件10cm\*cm效率突破20%、20cm\*20cm效率超19%、30cm\*30cm效率超18%。

图表：极电光能光伏

图表：极电光能光伏产品-玻璃幕墙





## 五、投资建议、受益标的及风险提示

## ■ 投资建议

- 钙钛矿行业处于初期，蕴含巨大机遇，给予行业“推荐”评级。
- 设备企业率先受益，部分企业如捷佳伟创、德龙激光、京山轻机、大族激光等已实现交付，关注其他领域的涂布、真空镀膜等设备公司可能在钙钛矿电池领域中的动态。
- **受益标的**：捷佳伟创、京山轻机、德龙激光、大族激光、帝尔激光、杰普特、迈为股份、科恒股份、奥来德、恩曼斯特（未上市）等

## ■ 风险提示

- 钙钛矿电池产业化进度不及预期；行业竞争加剧；下游行业景气度不及预期；公开信息有误。



## 分析师承诺

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，保证报告所采用的数据均来自合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，通过合理判断并得出结论，力求客观、公正，结论不受任何第三方的授意、影响，特此声明。

## 评级说明

| 公司评级标准                         | 投资评级 | 说明                             |
|--------------------------------|------|--------------------------------|
| 以报告发布日后的6个月内公司股价相对上证指数的涨跌幅为基准。 | 买入   | 分析师预测在此期间股价相对强于上证指数达到或超过15%    |
|                                | 增持   | 分析师预测在此期间股价相对强于上证指数在5%—15%之间   |
|                                | 中性   | 分析师预测在此期间股价相对上证指数在-5%—5%之间     |
|                                | 减持   | 分析师预测在此期间股价相对弱于上证指数5%—15%之间    |
|                                | 卖出   | 分析师预测在此期间股价相对弱于上证指数达到或超过15%    |
| 行业评级标准                         |      |                                |
| 以报告发布日后的6个月内行业指数的涨跌幅为基准。       | 推荐   | 分析师预测在此期间行业指数相对强于上证指数达到或超过10%  |
|                                | 中性   | 分析师预测在此期间行业指数相对上证指数在-10%—10%之间 |
|                                | 回避   | 分析师预测在此期间行业指数相对弱于上证指数达到或超过10%  |

## 华西证券研究所：

地址：北京市西城区太平桥大街丰汇园11号丰汇时代大厦南座5层

网址：<http://www.hx168.com.cn/hxzq/hxindex.html>

# 免责声明

华西证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具备证券投资咨询业务资格。本报告仅供本公司签约客户使用。本公司不会因接收人收到或者经由其他渠道转发收到本报告而直接视其为本公司客户。

本报告基于本公司研究所及其研究人员认为的已经公开的资料或者研究人员的实地调研资料，但本公司对该等信息的准确性、完整性或可靠性不作任何保证。本报告所载资料、意见以及推测仅于本报告发布当日的判断，且这种判断受到研究方法、研究依据等多方面的制约。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及预测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息始终保持在最新状态。同时，本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者需自行关注相应更新或修改。

在任何情况下，本报告仅提供给签约客户参考使用，任何信息或所表述的意见绝不构成对任何人的投资建议。市场有风险，投资需谨慎。投资者不应将本报告视为做出投资决策的惟一参考因素，亦不应认为本报告可以取代自己的判断。在任何情况下，本报告均未考虑到个别客户的特殊投资目标、财务状况或需求，不能作为客户进行客户买卖、认购证券或者其他金融工具的保证或邀请。在任何情况下，本公司、本公司员工或者其他关联方均不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也不对任何人因使用本报告而导致的任何可能损失负有任何责任。投资者因使用本公司研究报告做出的任何投资决策均是独立行为，与本公司、本公司员工及其他关联方无关。

本公司建立起信息隔离墙制度、跨墙制度来规范管理跨部门、跨关联机构之间的信息流动。务请投资者注意，在法律许可的前提下，本公司及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券或期权并进行证券或期权交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务。在法律许可的前提下，本公司的董事、高级职员或员工可能担任本报告所提到的公司的董事。

所有报告版权均归本公司所有。未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，如需引用、刊发或转载本报告，需注明出处为华西证券研究所，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。