



电力设备与新能源行业研究

买入（维持评级）
行业深度研究

证券研究报告

新能源与电力设备组
 分析师：姚遥（执业 S1130512080001）
 yaoy@gjq.com.cn

钙钛矿行业深度：提效奔逸绝尘，产业化倍道而进——高效太阳能

电池系列深度（五）

投资逻辑：

钙钛矿电池理论极限效率及实验室提效速度均远高于晶硅，有望在未来接力 N 型电池创建新的技术周期：N 型电池时代，可大规模量产的 N 型电池技术路线正在以年化提效 0.5% 的速度逼近单晶硅电池的理论极限效率——29.4%，展望下一代的电池技术路线，钙钛矿电池工艺凭借着理论上的高极限效率及低成本脱颖而出，成为目前可见的“终局”电池技术路线。在理想情况下，单结钙钛矿电池理论极限效率达到 31%，目前实验室最高转换效率 26%。同时钙钛矿为平台型工艺，可以与现有的 N 型 TOPCon、HJT 工艺相结合，在晶硅电池的基础上延伸出晶硅-钙钛矿叠层电池产品，目前晶硅-钙钛矿双结电池理论极限可以达到 35%，实验室最高效率 33.7%。从技术提出到实验室效率突破 25%，钙钛矿电池仅用了十年，而晶硅电池足足经过了 60 年的研发，足以体现出钙钛矿的提效潜力及光明的未来应用场景。

钙钛矿电池设备和而不同，传统晶硅电池核心设备厂商具备先发优势：在典型的钙钛矿电池的制作中，电池/组件工艺流程历经四道沉积工序、四次激光划刻，激光设备与镀膜设备的价值量及重要性较晶硅电池显著提升。对于传统的晶硅电池而言，镀膜及激光工艺并不陌生，晶硅电池发展到 N 型时代，优质的薄膜及其界面一定是光伏电池提效的趋势之一；同时随着 xBC 产能的逐步释放，激光设备稳定性/工艺水平快速提升，这些都为钙钛矿电池工艺的发展打下了坚实的基础。钙钛矿工艺流程中镀膜、激光设备难度在晶硅的基础上进一步提升，传统的晶硅电池核心设备厂商有望凭借丰富的设备调试经验及领先的研发能力去匹配全新的钙钛矿电池材料体系，第一时间推出相对应的高性能设备。目前钙钛矿 GW 级别产线价值量约为 6 亿元，其中镀膜设备价值量占比接近 50%，激光设备价值量占比超过 20%，较此前晶硅电池生产线中价值量有显著提升，随着未来钙钛矿组件大规模投入量产，相关设备企业有望直接受益。

晶硅为基，钙钛矿为矛，有望实现产业共赢：纯钙钛矿电池的材料体系与封装体系与现有的晶硅电池完全不同，因此是一种“颠覆现有产业体系”的技术。而晶硅-钙钛矿电池不会对现有产业链形成过大的冲击，就可以打破现有光伏产品的效率壁垒，同时具备相比单节钙钛矿电池更高的理论极限效率，因此有望成为“终极”电池技术路线中的产业共赢方案。

产业化仍需假以时日，重点关注钛矿电池产业化事件催化：根据我们测算，现阶段在各工艺场景下单结钙钛矿组件成本约在 1.30-1.35 元/W 左右，较当前晶硅仍不具备性价比。随着量产设备逐步成熟、效率持续提升、寿命及可靠性问题得到解决，钙钛矿组件成本有望降至 0.5-0.6 元/W，但尚未看到明确的时间节点。已布局的主流厂商钙钛矿中试线上若在钙钛矿材料的寿命及稳定性、大面积组件的转换效率、制造端总成本、钙钛矿整线量产能力等问题上有所突破，势必会映射为市场中钙钛矿 GW 级产线招标规模激增、落地规模扩大、建设进度加快，因此需要紧盯相关事件催化。

投资建议与估值

针对钙钛矿电池产业化事件催化所带来的投资机会，目前看主要有三个方向：方向一是可以提供钙钛矿各类功能层制备所需的镀膜设备、涂布设备或是划分电池的关键激光设备厂商，重点推荐捷佳伟创、迈为股份、京山轻机；方向二是有望受益于钙钛矿产业化所带来的封装体系变化的相关材料企业，重点推荐金晶科技；第三个方向是钙钛矿产能布局相对领先的头部制造企业，重点推荐协鑫科技。

风险提示

钙钛矿产业化进展不及预期，钙钛矿设备降本不及预期，晶硅电池成本下降过快风险。



内容目录

1、平价时代，效率的提升仍然是光伏技术进步的主旋律.....	5
1.1 钙钛矿的优势在哪里？——有望引领降本增效达到全新高度.....	5
1.2 钙钛矿电池有什么特性？——吸光材料性能优异，结构多样化.....	8
1.3 一二级联动同赴钙钛矿研发，产业化进展持续推进.....	10
2、钙钛矿电池工艺流程简洁，核心环节设备价值量有显著提升.....	14
2.1 激光工序成为核心环节，涉及环节多，价值量提升明显.....	15
2.2 传输层决定器件性能下限，传统光伏设备企业在镀膜环节具有先发优势.....	16
2.3 钙钛矿层决定器件效率上限，涂布设备核心零部件国产替代空间大.....	17
2.4 封装环节技术要求提高，独特组件结构颠覆晶硅路线.....	19
3、钙钛矿叠层技术持续推进，或将成为终极电池工艺的产业共赢方案.....	20
3.1 钙钛矿-晶硅叠层电池，光能极致利用技术.....	20
3.2 HJT、TOPCon 电池均可以与钙钛矿结合为叠层电池，研发效率持续提升.....	22
4、投资标的.....	25
4.1 捷佳伟创：光伏电池设备平台型企业，已推出钙钛矿整线设备.....	25
4.2 迈为股份：泛半导体领域高端装备制造制造商.....	26
4.3 金晶科技：国内超白玻璃龙头，布局绿色建筑、绿色能源两大赛道.....	27
4.4 京山轻机：国际化智能装备制造企业，深化钙钛矿设备布局.....	27
4.5 协鑫科技：钙钛矿组件制造商，GW 级产线建设进行时.....	28
5、风险提示.....	29

图表目录

图表 1：光伏电池技术及效率发展路径.....	5
图表 2：十年间，单结钙钛矿实验室效率提升 12pct.....	5
图表 3：钙钛矿-晶硅双结电池效率七年提升 10pct+.....	5
图表 4：钙钛矿电池技术理论极限效率远超晶硅单结电池.....	6
图表 5：实验室最高钙钛矿组件效率记录基本在 1cm ² 左右的面积上实现.....	6
图表 6：年内受权威机构认证的大面积钙钛矿组件效率范围在 17~27%.....	7
图表 7：各工艺场景下，单晶钙钛矿组件成本 1.34 元/W 左右.....	8
图表 8：钙钛矿材料中离子组合的种类丰富.....	8
图表 9：钙钛矿材料的光吸收范围广且连续可调.....	9
图表 10：钙钛矿太阳能电池电流产生经历三个主过程.....	9



图表 11:	p-i-n 平面结构起步最晚但发展潜力巨大.....	10
图表 12:	国家层面钙钛矿行业政策.....	11
图表 13:	钙钛矿产业链企业融资情况.....	12
图表 14:	根据当前部分公司已公布的产能规划, 预计到 2030 年钙钛矿落地产能将达 40GW+.....	13
图表 15:	国内钙钛矿应用项目落地情况.....	13
图表 16:	单结钙钛矿电池工艺流程 (以反型结构为例).....	14
图表 17:	激光作用区域示意图.....	15
图表 18:	钙钛矿组件串联结构示意图.....	15
图表 19:	激光企业钙钛矿布局情况.....	15
图表 20:	PVD 具体工艺对比.....	16
图表 21:	钙钛矿材料真空蒸镀示意图.....	17
图表 22:	镀膜环节设备企业进展.....	17
图表 23:	钙钛矿材料稳定性差.....	18
图表 24:	一步旋涂法示意图.....	18
图表 25:	两步旋涂法示意图.....	18
图表 26:	狭缝涂布示意图.....	18
图表 27:	钙钛矿涂布设备企业进展.....	19
图表 28:	各厂商工艺路线选择.....	19
图表 29:	晶硅组件与钙钛矿组件俯视图对比.....	19
图表 30:	胶膜封装方案示意图.....	20
图表 31:	物理沉积封装方案示意图.....	20
图表 32:	钙钛矿与晶硅能隙组合接近最优理论极限效率.....	20
图表 33:	叠层电池光谱能量利用率提高.....	21
图表 34:	钙钛矿子电池在两端叠层中多选择反式结构.....	21
图表 35:	钙钛矿组件-晶硅组件构成四端物理堆垛式叠层结构.....	22
图表 36:	钙钛矿-HJT 叠层结构示意图.....	23
图表 37:	钙钛矿-HJT 叠层电池布局厂商最新进展.....	23
图表 38:	高效钙钛矿-TOPCon 叠层电池三大技术挑战.....	24
图表 39:	钙钛矿-TOPCon 叠层电池市场动态.....	24
图表 40:	重点推荐标的及值得关注的相关企业信息简介.....	25
图表 41:	2023 年捷佳伟创设备在钙钛矿领域快速发展.....	26
图表 42:	捷佳伟创 5 in 1 钙钛矿镀膜设备工作区俯视图.....	26
图表 43:	迈为钙钛矿-HJT 叠层整线设备规划.....	27
图表 44:	公司钙钛矿及叠层电池组件主要产品.....	28
图表 45:	协鑫光电发展历程.....	28



图表 46: 组件级叠层方案示意图 (并联结构) 29

图表 47: 电池级叠层方案 (串联) 29

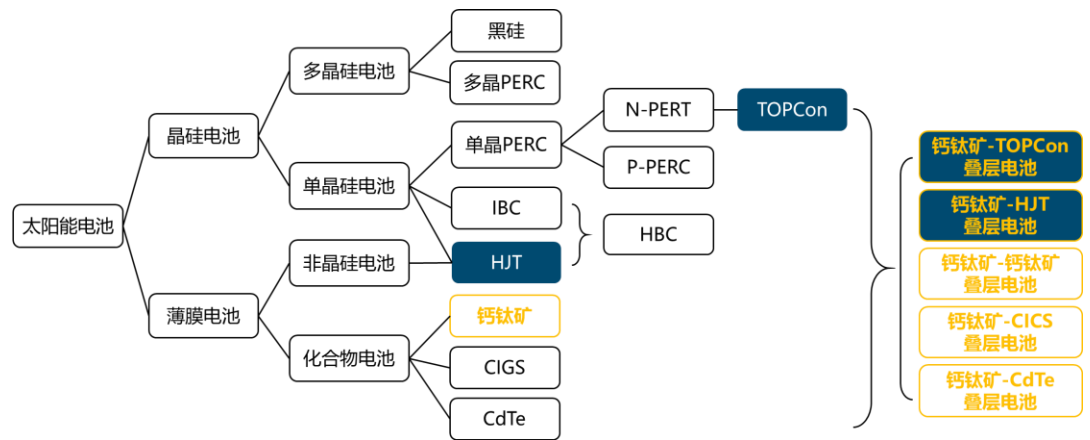


1、平价时代，效率的提升仍然是光伏技术进步的主旋律

光伏电池转换效率的持续提升一直是整个光伏行业技术迭代的核心之一。2018 年以前，市场上多采用多晶铝背场 (BSF) 电池，2018 年，常规 BSF 电池转换效率接近理论极限，快速拉晶、金刚线切片等技术升级的规模应用促进单晶工艺快速渗透，主流路线切换至单晶 PERC 电池时代，产业化当年平均转换效率便突破 21%。2018-2023 年 PERC 技术效率持续提升，转换效率逐步接近理论极限，由于 N 型硅基相比 P 型表现出更大的效率提升潜力，因此产业里 N 型电池产能快速扩张，这一阶段里 N 型 TOPCon 电池工艺凭借极高的性价比脱颖而出，成为 N 型电池时代主流工艺，同时随着 24 年 HJT、xBC 工艺在放量的过程中陆续兑现高效率、差异化竞争优势及逐步提升的性价比，也将在多元化的应用场景中有着各自的技术优势，N 型高效时代已全面到来。

如果把 2022 年定义为 N 型电池产能量产的元年，我们可以看到能够大规模量产的 N 型电池技术路线正在以年化提效 0.5% 的速度野蛮生长，凭借着国产设备厂商的成熟设备及头部大厂研发人员对于光伏工艺的深刻理解在提效的道路上逐步逼近晶硅电池效率的理论极限，同时也加速了行业对下一代电池技术发展方向的探索热情。其中钙钛矿电池工艺凭借着理论上的高极限效率及低成本脱颖而出，成为目前可见的“终局”电池技术路线。

图表1：光伏电池技术及效率发展路径



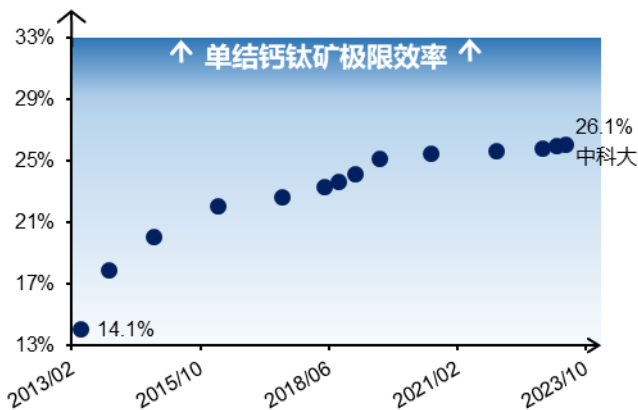
来源：国金证券研究所绘制

1.1 钙钛矿的优势在哪里？——有望引领降本增效达到全新高度

根据现有统计数据，目前单结钙钛矿最高实验室效率 26.1% (中国科学技术大学)，从技术提出到实验室效率突破 26%，钙钛矿电池仅用了十年时间，而晶硅电池从 1954 年提出到 2016 年异质结技术率先突破 26% 效率大关，足足经过了 60 年的研究。同时，钙钛矿-晶硅叠层电池实验室效率记录也从 23.6% 提升至最新的 33.9% (隆基)，基于钙钛矿材料的太阳能电池在 10 年内均实现了 10pct 以上的效率提升，不仅是钙钛矿电池的产业化研发进展取得快速突破，钙钛矿材料的明朗应用前景也同样获得了广泛认可。

图表2：十年间，单结钙钛矿实验室效率提升 12pct

图表3：钙钛矿-晶硅双结电池效率七年提升 10pct+



来源：NREL，国金证券研究所

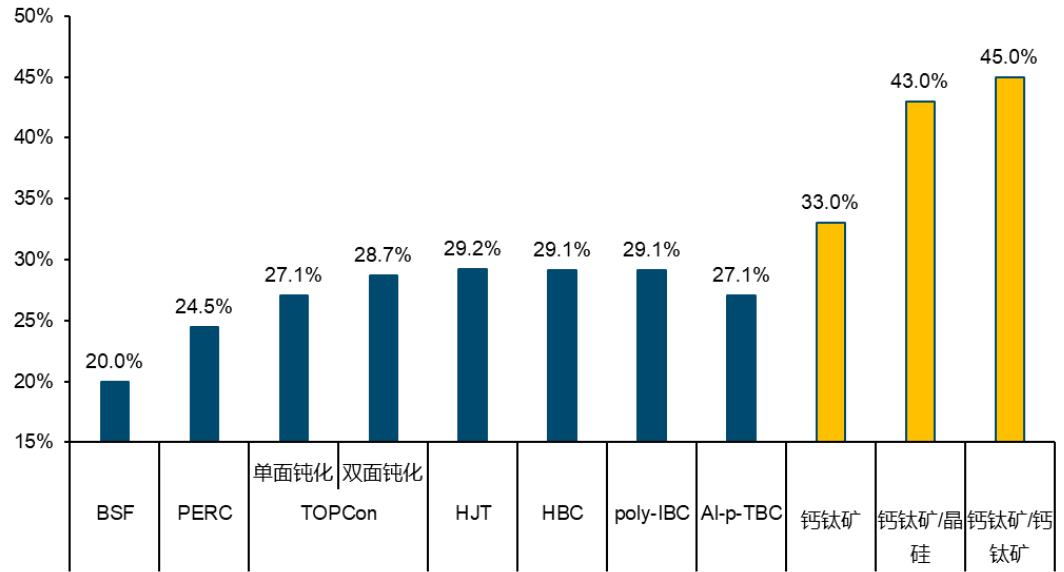
来源：NREL，国金证券研究所

钙钛矿电池的提效空间也是巨大的。根据 ISFH、隆基的计算，考虑到各类钝化技术导入提效的情况下，TOPCon 单/双面钝化技术理论极限效率分别可达到 27.1%/28.7%，HJT、xBC 分别为 29.2%、29.1%，均未突破 30%。而根据光伏电池理论效率计算的基本模型 (肖克利-奎塞尔模型，S-Q)，单结晶硅电池极限效率为 29.4%，钙钛矿电池理论极限高达 33%，并且钙钛矿可以与其他光伏技术结合成叠层电池，双结的理论极限效率达 43% 以上。提效空间巨大的钙钛矿电池



在未来有望接棒 N 型技术，成为下一代主流路线。

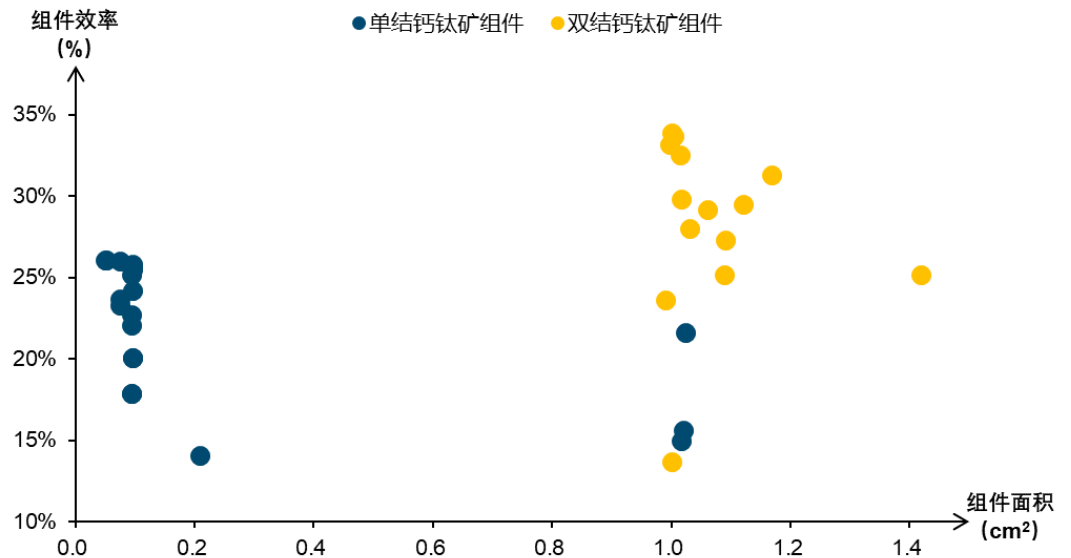
图表4：钙钛矿电池技术理论极限效率远超晶硅单结电池



来源：ISFH, 《Guide for the perplexed to the Shockley-Queisser model for solar cells》，隆基，国金证券研究所

除偏理论的实验室效率和最高效率外，专业钙钛矿厂商所生产的大面积钙钛矿组件效率也逐步展现出产业化潜力。一直以来，实验室里实现的高效率都是来自 1cm^2 左右的小面积钙钛矿组件，面积扩大则会严重影响效率。而在 2023 年，根据仁烁光能、极电光能、协鑫光电等头部钙钛矿组件企业公众号披露，受权威机构认证的钙钛矿组件效率范围在 17~27%，且一半以上器件面积达到百平方厘米级别。同时我们也看到平方米量级下的钙钛矿组件效率正在逐步靠近产业化需求，2023 年 11 月，协鑫光电 2m^2 单结钙钛矿组件效率达到 18.04% 获中国计量科学院认证，接近 182 版型/72 片晶硅组件面积 ($1134\text{mm} \times 2278\text{mm} = 2.58\text{m}^2$)。

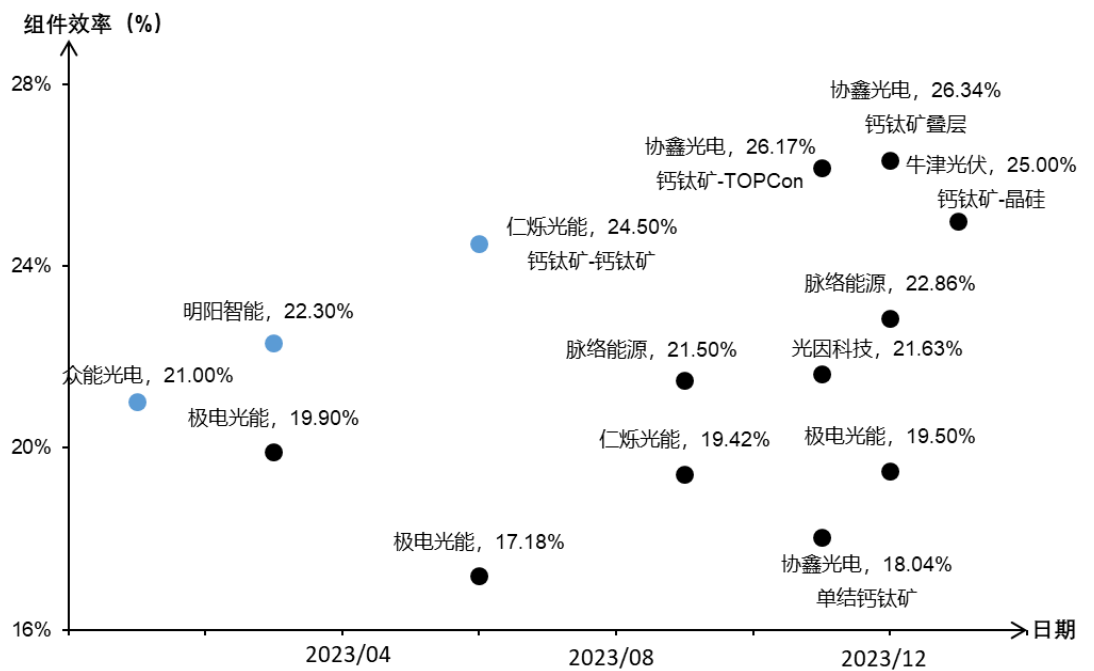
图表5：实验室最高钙钛矿组件效率记录基本在 1cm^2 左右的面积上实现



来源：NREL，国金证券研究所



图表6: 年内受权威机构认证的大面积钙钛矿组件效率范围在 17~27%



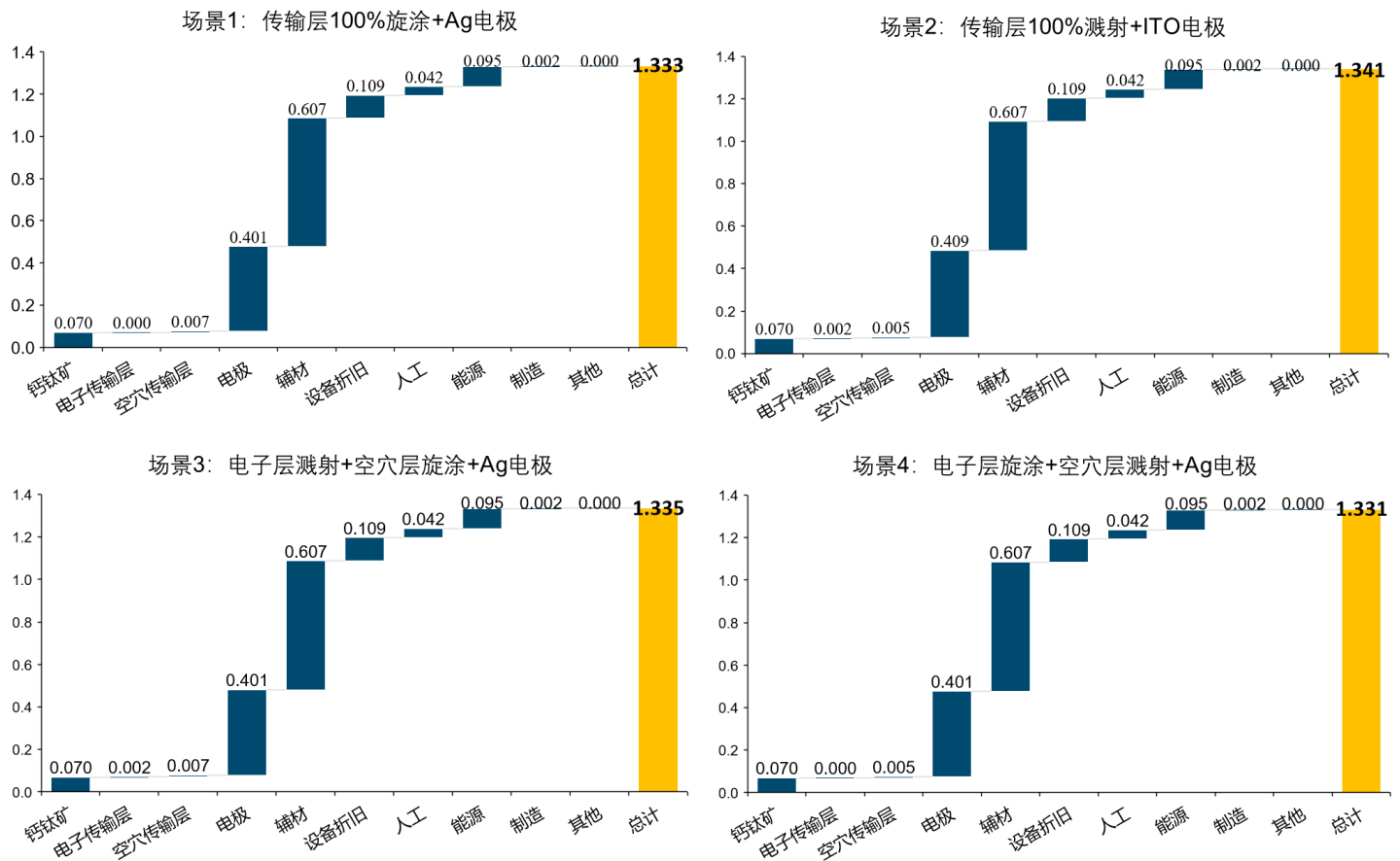
来源: 各公司公众号, 国金证券研究所整理 (蓝色: $1\text{cm}^2 \leq \text{组件面积} \leq 331\text{cm}^2$; 黑色: 组件面积 $> 331\text{cm}^2$)

从成本的角度来说, 原材料廉价易得, 且钙钛矿材料是直接带隙半导体, 具有较高的吸光系数 ($\sim 50\text{cm}^{-1}$), 几百纳米的薄膜就可以充分吸收太阳光入射光子, 相比于吸光层厚度需要达到微米级别的无机半导体器件, 高吸收系数很大程度降低了器件成本。

我们假设单结钙钛矿组件转换为 17%, 钙钛矿吸光层以 FAPbI_3 为主要材料体系, 采用涂布技术, 氧化锡作为电子传输层材料, 可以通过 PVD 溅射或涂布法制备; 有机材料 Spiro-OMeTAD 作为空穴传输层只能采用涂布法制备, 氧化镍作为空穴传输层采用 PVD 溅射制备, 则现阶段在各工艺场景下, 单结钙钛矿组件成本在 1.34 元/W 左右, 其中钙钛矿材料成本占比约 5%, 主要原材料甲脒氢碘酸盐 (FAI) 成本约 0.015 元/W、碘化铅 (PbI_2) 成本约 0.022 元/W, 其他有机溶剂成本约 0.030 元/W。目前钙钛矿组件成本主要受限于设备投资额较大、器件效率较低, 根据协鑫光电董事长在第二届国际气相经济高峰论坛中的演讲, 进入量产的钙钛矿组件成本预计在 0.5-0.6 元/W。



图表7: 各工艺场景下, 单晶钙钛矿组件成本 1.34 元/W 左右

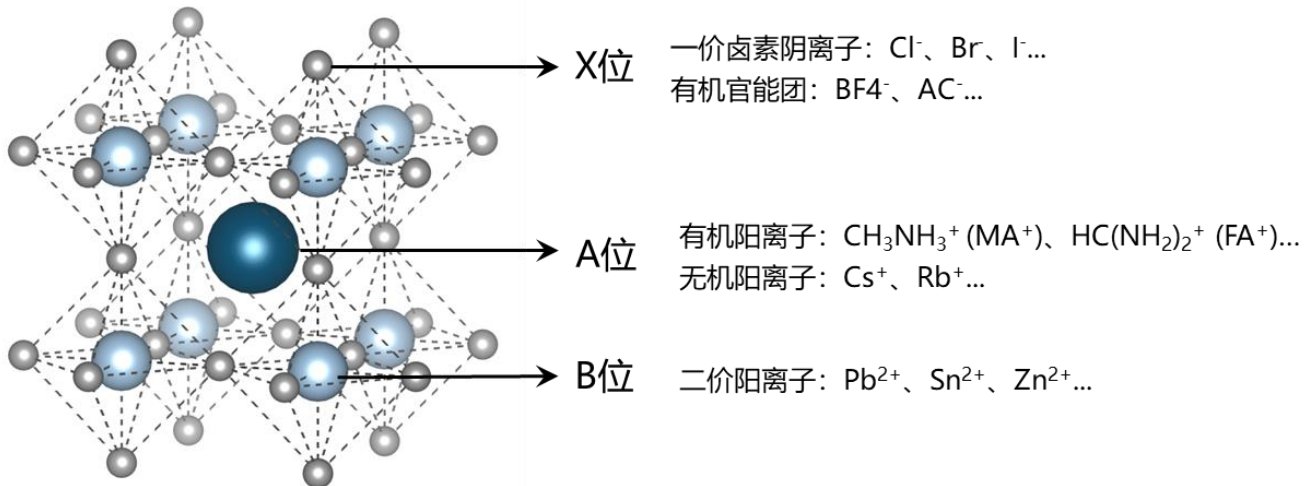


来源: 国金证券研究所测算

1.2 钙钛矿电池有什么特性? ——吸光材料性能优异, 结构多样化

钙钛矿是 ABX_3 结构立方晶系化合物的统称, A、B、X 位被三种不同类型的离子占据, 每个类型对应的种类丰富的具体离子, 不同的离子组合可以获得物理特性不同的钙钛矿材料。A 位离子决定钙钛矿材料的体系, 目前常用甲胺离子 (简写 MA^+ , 分子式 $CH_3NH_3^+$)、甲脒离子 (简写 FA^+ , 分子式 $HC(NH_2)_2^+$)、铯离子 (Cs^+)。B 位通常为二价阳离子, X 位为卤素离子或一价有机官能团。

图表8: 钙钛矿材料中离子组合的种类丰富



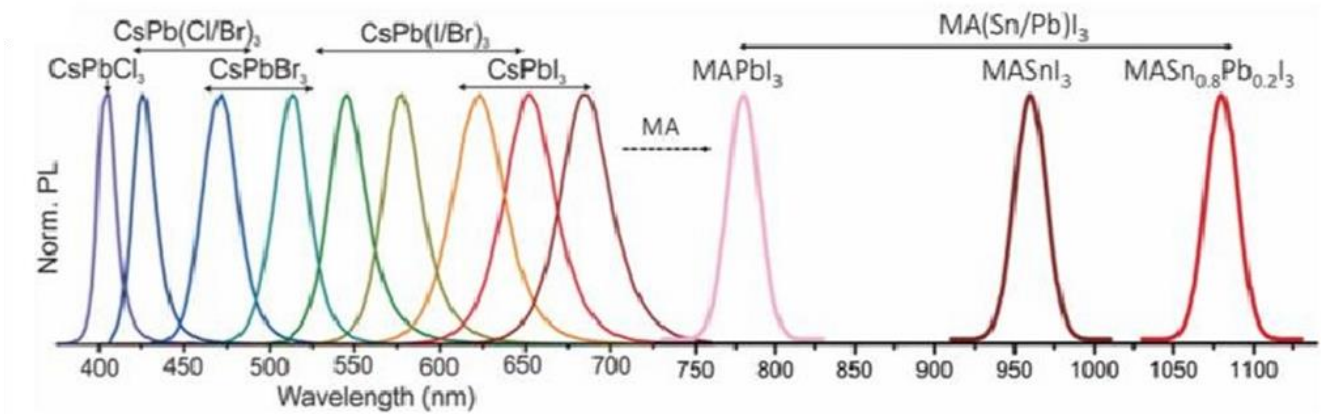
来源: 《掺杂与界面修饰增强钙钛矿太阳能电池性能的研究》, 国金证券研究所绘制



1994年，研究人员发现有机-无机钙钛矿材料的电学性质会随着晶体维度的变化而变化，为其应用于光伏领域提供了可能性。钙钛矿材料优异的光电性能体现在：

- 1) 电子-空穴对激活能低。电子、空穴能有效分离，不容易复合，提高载流子寿命；
- 2) 光吸收能力强。较薄的材料就可以实现对可见光的高效吸收，钙钛矿材料光吸收系数比晶硅大一个数量级；
- 3) 带隙可调。带隙决定可吸收的光波段范围，带隙较大不利于电池充分利用太阳光，带隙较小不利于器件获得高开路电压，因此带隙合适、组分优异且稳定的钙钛矿体系是获得高效稳定的光伏器件的前提。
- 4) 优异的电荷传输性能。钙钛矿材料中的缺陷以浅能级为主，对载流子寿命的影响较低，因此载流子的扩散长度长、迁移率高；此外，钙钛矿材料还具有双极性，即既可传输电子，也能传输空穴；载流子快速收集可保障光伏器件的输出效率。

图表9：钙钛矿材料的光吸收范围广且连续可调

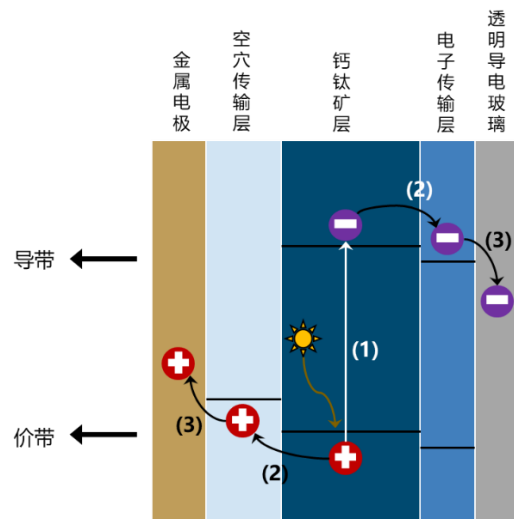


来源：《钙钛矿太阳能电池的缺陷钝化与界面能级调控研究》，国金证券研究所

钙钛矿太阳能电池以钙钛矿材料作为光吸收层，实现光电转换。钙钛矿太阳能电池的发电原理与 HJT 电池异曲同工，电流的产生经历三个主过程：1) 电子-空穴对的产生和分离；2) 自由载流子的传输；4) 载流子被收集并产生电流。

钙钛矿材料吸收光子（太阳光辐射的能量）后，价带中的电子跃迁到导带，相应空穴被留着价带，产生电子-空穴对。由于钙钛矿材料中电子和空穴之间的束缚能量很小，所以电子-空穴对在室温下迅速分离成为自由电子空穴。自由载流子在钙钛矿薄膜中传输，到达钙钛矿和电荷传输层界面。在内建电场作用下，自由电子和空穴分别被两侧的电子传输层和空穴传输层收集，再次传输到电极并从电池结构中输出至外电路，从而产生电流、电压，完成整个光电转换过程。

图表10：钙钛矿太阳能电池电流产生经历三个主过程



来源：《Towards stable and commercially available perovskite solar cells》，国金证券研究所绘制



钙钛矿电池的结构根据载流子传输方向可分为正型 (n-i-p) 和反型 (p-i-n)，其中正型根据有无介孔层进一步分为介孔结构和平面结构。

正式介孔结构是钙钛矿太阳能电池的早期研究方案，致密的电子传输层上方用相同材料的纳米颗粒实现多孔介观结构，作为钙钛矿材料的支撑，钙钛矿材料填充孔隙。介孔不仅起支撑作用，还可以促进光生电子的收集，在研究早期实现了较高的转换效率。但是介孔层制备需要在~500°C烧结，增加了钙钛矿电池制备工艺的复杂性和成本。

正式平面结构利用钙钛矿材料自身载流子具有的较高迁移率和较长的迁移长度，容易实现较高的转换效率。但为了保证空穴传输能力，需要掺杂迁移率高的盐类材料，难以避免引入一定的水分，影响钙钛矿材料稳定性。

反式结构因载流子输运方向与目前主流晶硅电池更为匹配，可构成叠层结构而被提出。反式平面结构制作过程中，钙钛矿材料可以完全隔绝水氧生长、填充因子高，虽然由于发展较晚，当前效率还不如 n-i-p 型，但与晶硅电池更高的适配性，使其在叠层电池的应用上有着巨大的潜力。

图表11: p-i-n 平面结构起步最晚但发展潜力巨大

	n-i-p 介孔结构	n-i-p 平面结构	p-i-n 平面结构
传输方向	正型	正型	反型
优点	1、介孔层为钙钛矿提供骨架支撑； 2、增大钙钛矿的接触面积，提高电子传输效率； 3、有效降低电子和空穴的非辐射复合。	1、利用钙钛矿材料自身优势； 2、简化器件结构，对高效钙钛矿电池的发展具有重要意义。	1、高温、光照稳定性良好； 2、几乎没有“迟滞”现象； 3、与市场主流晶硅电池机构更匹配。
缺点	1、介孔制备温度高达 400~500°C，增加了钙钛矿器件的制备工艺要求； 2、限制了柔性器件的开发可能。	难以兼顾效率和稳定性。	研究起步最晚，效率较低。
结构示意图			

来源:《Organic-inorganic hybrid lead halide perovskites for optoelectronic and electronic applications》，国金证券研究所绘制

1.3 一二级联动同赴钙钛矿研发，产业化进展持续推进

钙钛矿电池行业的政策发布自 2016 年“十三五”规划开始，后续各类能源、科技相关的国家层面政策中频繁提出，是钙钛矿产业化的强大推手。“十四五”规划提出，坚持创新驱动，高质量发展可再生能源，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。2023 年 3 月，中国光伏行业协会成立钙钛矿光伏电池标准专题组，推动钙钛矿光伏电池标准化工作，助力钙钛矿光伏电池技术进步和产业化发展。



图表12: 国家层面钙钛矿行业政策

时间	发布部门	政策名称	要点
2016年11月	国务院	《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》	突破先进晶硅电池及关键设备技术瓶颈,提升薄膜太阳能电池效率,加强 钙钛矿 、染料敏化、有机等新型高效低成本太阳能电池技术研发,大力发展太阳能集成应用技术,推动高效低成本太阳能利用新技术和新材料产业化,建设太阳能光电光热产品测试与产业监测公共服务平台,大幅提升创新发展能力。
2017年4月	科技部	《“十三五”材料领域科技创新专项规划》	前沿交叉电子材料。大面积二维电子功能材料、柔性电子材料、 钙钛矿电子材料 及上述材料异质结构的可控制备;有机/无机集成电子材料和器件。
2021年11月	国家能源局、科学技术部	《“十四五”能源领域科技创新规划》	研制基于溶液法与物理法的 钙钛矿电池量产工艺制程设备 ,开发高可靠性组件级联与封装技术,研发大面积、高效率、高稳定性、环境友好型的钙钛矿电池;开展 晶体硅/钙钛矿、钙钛矿/钙钛矿等高效叠层电池 制备及产业化生产技术研究。
2022年6月	科技部等九部门	《“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,以规模化市场推动前沿技术发展,持续推进光伏发电技术进步、产业升级。
2022年8月	工信部、财政部、商务部等	《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,开展新型高效低成本光伏电池技术研究和应用,开展智能光伏试点示范和行业应用。
2022年8月	科技部等九部门	《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022-2030年)》	新能源发电方面,研发高效硅基光伏电池、高效稳定 钙钛矿电池 等技术。
2022年10月	国家发改委、国家能源局	《关于促进光伏产业链健康发展有关事项的通知》	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,促进高质量发展。
2023年1月	工信部等六部门	《关于推动能源电子产业发展的指导意见》	加快智能光伏创新突破,发展高纯硅料、大尺寸硅片技术,支持高效低成本晶硅电池生产,推动 N 型高效电池、柔性薄膜电池、 钙钛矿及叠层电池 等先进技术的研发应用,提升规模化量产能力。
2023年3月	中国光伏行业协会	中国光伏行业协会标准化委员会钙钛矿光伏标准专题组成立	江华副秘书长在致辞中强调了从标准层面来引导和促进 钙钛矿 技术和产业发展的重要意义。“希望工作组成立后,能加快钙钛矿电池标准体系梳理和完善,并在此基础上快速有序、科学合理地开展相关标准制修订工作,为我国钙钛矿电池产业发展提供坚实的标准支撑。
2023年9月	国家能源局	《关于组织开展可再生能源发展试点示范的通知》	新型高效光伏电池技术示范。主要支持高效光伏电池、 钙钛矿及叠层太阳能电池 、新型柔性太阳能电池及组件等新型、先进、高效光伏电池技术应用,以规模化促进前沿技术和装备进入应用市场,持续推进光伏发电技术进步、产业升级。
2023年11月	工信部等五部门	《关于开展第四批之能光伏试点示范活动的通知》	试点优先考虑方向之一,先进光伏产品。包括高效晶硅太阳能电池(转换效率在 25%以上)、 钙钛矿及叠层太阳能电池 、先进薄膜太阳能电池,以及相关产业链配套高质量、高可靠、低成本设备及材料等方向。

来源: 国家能源局官网, 中国光伏行业协会官网, 国家发改委, 工信部, 科技部, 国务院, 国金证券研究所整理

政策指导下,钙钛矿组件研发及其设备配套企业在一级市场的融资活动相当活跃,部分企业在短短几年获得了多轮融资,例如纤纳光电 7 年 8 轮融资,这些企业大多数以高校资源为基石,以蓬勃的科研创新为动力,持续获得资本认可。二级市场对钙钛矿初创企业同样保持紧密关注。较著名的案例如协鑫 2016 年收购惟华光能成立协鑫光电,2022 年 5 月 B 轮融资腾讯入局,根据爱企查显示,目前持有公司股份 5.05%。



图表13: 钙钛矿产业链企业融资情况

公司名称	成立时间	业务	投资轮次	投资时间	投资金额 (人民币)
纤纳光电	2015年	钙钛矿太阳能电池组件研发商	种子轮	2015.08	
			天使轮	2017.11	
			Pre-A轮	2018.07	
			A轮	2019.01	
			A+轮	2019.09	
			B轮	2020.12	
			C轮	2021.01	3.6亿
			D轮	2022.10	
众能光电	2015年	钙钛矿技术及装备龙头	战略投资	2022.11	
致晶科技	2016年	钙钛矿量子点材料研发商	种子轮	2018.07	
			天使轮	2018.11	
			Pre-A轮	2019.04	
			Pre-A+轮	2019.07	
			A轮	2021.02	数千万元
曜能科技	2017年	钙钛矿光伏电池企业	B轮	2022.07	
			C轮	2023.03	
			天使轮	2018.03	
弗斯迈	2019年	钙钛矿整线集成商	A轮	2021.08	数千万元
			B轮	2022.03	
			天使轮	2020.05	
协鑫光电	2019年	钙钛矿太阳能电池组件研发商	A轮	2020.07	1.8亿
			A+轮	2020.10	
			Pre-B轮	2021.03	过亿
			B轮	2022.05	数亿
			B+轮	2022.12	5亿
兴晟能源	2020年	柔性光伏电池组件研发商	Pre-A轮	2023.08	数千万元
极电光能	2020年	钙钛矿组件制造商	Pre-A轮	2021.10	2.2亿元
			A轮	2023.03	数亿
昶火微科	2021年	微电子薄膜工艺方案解决商	A轮	2023.02	
仁烁光能	2021年	钙钛矿太阳能电池组件研发商	Pre-A轮	2022.08	数亿
			A轮	2024.01	数亿元
光晶能源	2022年	钙钛矿太阳能电池组件研发商	天使轮	2022.11	3000万
			A轮	2023.07	1.6亿
脉络能源	2022年	钙钛矿光伏电池企业	天使轮	2022.11	
光因科技	2022年	新兴能源技术研发商	天使轮	2023.06	5000万
无限光能	2022年	钙钛矿太阳能电池研发商	天使轮	2022.06	数千万元
乐成智能	2022年	钙钛矿激光设备解决商	天使轮	2023.06	
乐天钙钛	2023年	钙钛矿太阳能电池及组件研发商	A轮	2023.09	数千万元
			种子轮	2023.07	千万级
永珈光能	2023年	钙钛矿光伏研发企业	种子轮	2024.01	
柔烁光电	2023年	柔性钙钛矿光伏电池组件研发商	种子轮	2023.10	
			天使轮	2024.01	千万级

来源: 36氪创投平台, 国金证券研究所整理整理



基于光伏产业对效率提升的持续关注，当前国内较为领先的钙钛矿企业主要可以分为三类，一类是专业从事钙钛矿产品研发和制造的创新型高科技企业，如极电光能、协鑫光电、纤纳光电等；第二类是研发布局型巨头企业，如宁德时代、比亚迪、隆基、通威等；第三类是以高校、科研院所为背景，如万度光能、众能光储、仁烁光能等。根据各公司目前公开的产能规划及落地展望梳理，预计到 2025 年，国内钙钛矿产能将超过 22GW，到 2030 年，产能规模将突破 40GW。

图表14：根据当前部分公司已公布的产能规划，预计到 2030 年钙钛矿落地产能将达 40GW+

厂家 (MW)	2022	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
纤纳光电	120	120	1120	2120	3120	4120	5120	5120	5120
协鑫光电	110	110	1110	1110	2110	2110	2110	2110	2110
极电光能	150	150	1150	3150	6150	6150	6150	6150	6150
仁烁光能		150	150	150	150	150	150	150	150
宁德时代		100	100	100	100	100	100	100	100
黑晶光电				7000	7000	7000	7000	7000	7000
无限光能		10	100	100	100	100	100	100	100
光晶能源	10	10	100	100	100	100	100	100	100
万度光能		200	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
大正微纳			100	100	100	100	100	100	100
鑫磊鑫			1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
众能光储			1000	2000	3000	3000	3000	3000	3000
合特光电		100	100	100	100	100	100	100	100
宝馨光能		0.01	0.01	100	1000	1000	1000	1000	1000
锦能新能源			150	450	1450	1450	1450	1450	1450
杭萧钢构			1000	2000	3000	4000	5000	5000	5000
脉络能源			100	100	100	100	100	100	100
杭州柯林				100	100	100	100	100	100
柔烁光电			10	110	110	110	110	110	110
奥联光能		50	50	50	50	50	50	50	50
飞米新能源				500	500	500	500	500	500
合计产能	390	1000.01	7340.01	22440	32340	35340	38340	39340	40340

来源：DT 新材料，协鑫光电公众号，北极星光伏网，华夏能源网，极电光能公众号，国金证券研究所整理

钙钛矿电池的产业化进程加快不仅展现在产能扩张上，规划化示范电站落地及各类场景应用案例的增加也给投资者们带来更多信心。首先，钙钛矿作为薄膜电池技术之一，美观、弱光发电能力强，应用场景首选光伏建筑一体化 (BIPV) 幕墙面。第二，基于薄膜的柔性特点，可以将钙钛矿光伏电池应用在穿戴光伏、新能源汽车等领域。第三，也是进展较快的应用方向之一——大型地面电站场景。2023 年 11 月，三峡集团库布其 200 万千瓦光伏治沙项目送电成功，为该项目配套建设的 1MW 钙钛矿地面光伏电站也成功并网，电站采用 11200 片纤纳光电自主研发的钙钛矿 α 组件，是全球首个商业化运行的兆瓦级钙钛矿地面光伏项目。2023 年 12 月，协鑫光电 1m*2m 商用尺寸兆瓦级钙钛矿组件光伏示范项目在华能青海共和光伏电站全面投运。

图表15：国内钙钛矿应用项目落地情况

时间	钙钛矿企业	产品	应用场景	事件
2022 年 1 月	协鑫光电	大尺寸钙钛矿组件	建筑	2022 年北京冬奥会 Project Y 钙钛矿小屋，发电功率达到 10KW，每年预计可发出 1 万度电。
2023 年 6 月	大正微纳	柔性钙钛矿太阳能电池	BIPV	国际首个柔性钙钛矿太阳能电池组件与建筑结合的示范工程项目建设。
2023 年 11 月	纤纳光电	α 组件	集中式电站	三峡集团库布其 200 万千瓦光伏治沙项目中的 1MW 钙钛矿地面光伏电站成功并网，共安装钙钛矿光伏组件 11200 块。
2023 年 12 月	协鑫光电	2 m ² 组件	集中式电站	全球最大商用尺寸兆瓦级钙钛矿组件光伏示范项目在华能青海共和光伏电站全面投运。

来源：纤纳光电公众号，大正微纳公众号，中国电力报公众号，国金证券研究所整理



2、钙钛矿电池工艺流程简洁，核心环节设备价值量有显著提升

典型的钙钛矿电池/组件工艺流程历经四道沉积工序、四次激光划刻，涉及三大材料（钙钛矿功能层、电荷传输层、电极）、四种设备（激光设备、真空镀膜设备、涂布设备、封装设备）。

图表16：单结钙钛矿电池工艺流程（以反型结构为例）



来源：《2023 势银 钙钛矿电池产业发展蓝皮书》，国金证券研究所绘制



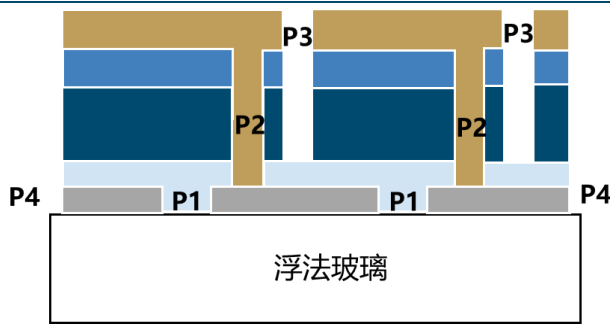
2.1 激光工序成为核心环节，涉及环节多，价值量提升明显

光伏电池面积增大时，器件效率减小，这种效率损失趋势是任何类型太阳能电池都无法避免的。SCI 论文《Towards the scaling up of perovskite solar cells and modules》中提到，透明电极的电阻导致整体器件串联电阻随面积增加而线性增加。因此，钙钛矿电池要符合产业化需求，向大面积高效率发展，必须合理设计组件结构，减少串联电阻的影响。

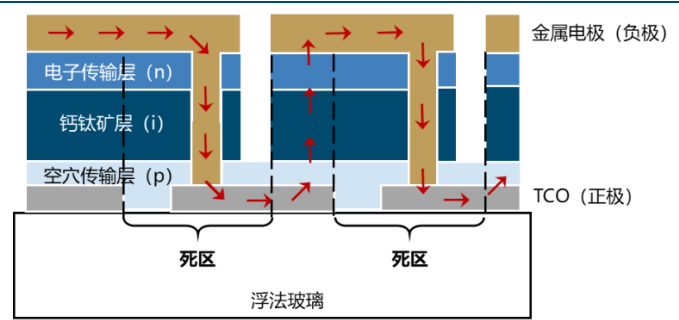
激光工序是保证钙钛矿组件大面积效率的必要步骤。通过激光将组件内部划分成各独立的子电池，并以串联的方式制作成模块。在组件制造流程中，一共要进行 4 道激光，其中三次 (P1-3) 划线步骤实现子电池的分割和连接，最后一次 (P4) 为边缘整型，也叫清边。

第一次划线 (P1) 分隔 TCO 玻璃的透明导电氧化物薄膜层。第二次划线 (P2) 在所有功能层沉积完成之后，形成内部独立小电池，激光能量需要足够划开钙钛矿层和两个传输层，暴露出 TCO 薄膜，使下一步金属电极蒸镀过程中能够让子电池之间的正负极相互连接。第三次划线 (P3) 在金属电极沉积之后进行，分割相邻子电池的正极，激光穿透钙钛矿层、传输层、金属电极，但要保证 TCO 的连续性。最后，激光清边 (P4) 对电池片侧面进行修整，避免钙钛矿层与电极直接接触，起绝缘作用。

图表17: 激光作用区域示意图



图表18: 钙钛矿组件串联结构示意图



来源：德沪涂膜设备公众号，国金证券研究所绘制

来源：《大面积钙钛矿太阳能电池及组件制备工艺与性能研究》，国金证券研究所绘制

从串联电流的方向可以看出，激光划线后，组件中有一部分不产生电流的区域，称为死区。死区无法贡献发电，因此死区面积越小，电池的效率损失也会减少。死区的宽度等于 p1-3 激光划线线宽+两次激光移动距离，因此对激光的聚焦程度、激光能量、脉冲控制和机械精细移动提出了较高要求。此外，3 次划线中有 2 次要经过钙钛矿吸光层，考虑到激光热量对钙钛矿材料有一定的破坏影响，除了工作区域尽可能窄且精细外，激光工作时间和能量辐射也需要优化。

不同的激光道次需要不同波长、不同技术参数的激光器，因此在钙钛矿工艺流程中激光设备的价值量获得了显著提升。随着产业内对于钙钛矿的关注度持续提升，规划产能量级快速增长，多家激光企业开始提前介入并进行了布局。例如，德龙激光在 2022 年成立新能源事业部，布局锂电、光伏等新能源领域，当年实现销售收入 4973.45 万元 同年首套钙钛矿薄膜太阳能电池生产整段设备（百兆瓦级）顺利交付客户，2023 上半年公司开发完成针对钙钛矿薄膜太阳能电池的第二代生产设备，对设备的激光器、光学系统、加工幅面和生产效率等都进行了迭代升级。杰普特于 2021 年向大正微纳交付首套柔性钙钛矿膜切设备；2023 年 7 月，100MW 钙钛矿电池量产线激光划线全套设备顺利交付协鑫光电（2023 半年报披露）；公司 1m*2m 大尺寸钙钛矿 P1-P3 工序激光划线设备在客户端实现持续批量生产，根据公司公众号最新报道，2024 年初可将电池组件死区宽度稳定控制在 150 μm 内，居于行业内领先水平，获得头部客户认可。

图表19: 激光企业钙钛矿布局情况

企业	进展
德龙激光	2022 年首套钙钛矿薄膜太阳能电池生产整段设备（百兆瓦级）顺利交付并实现销售收入，目前公司技术迭代至第二代。
英诺激光	布局了面向 BC、钙钛矿等多种电池技术所需激光器、光学模组或关键设备。
杰普特	1m*2m 大尺寸钙钛矿 P1/P2/P3 整套激光划线设备在客户端实现持续批量生产，其电池组件死区宽度可稳定控制在 150 μm 内，居于行业内领先水平。
帝尔激光	在钙钛矿太阳能电池 TCO 层、氧化物层、电极层的生产制程中均有应用，2022 年已有小批量订单并已完成交付。
大族激光	自主研发钙钛矿激光刻划设备，已实现量产销售，与协鑫光电等行业头部客户保持合作关系。
乐成智能	2023 年 10 月向头部钙钛矿组件企业交付首套百兆瓦级激光生产线

来源：大族激光 2023 中报，德龙激光 2022 年报，杰普特公众号，深交所互动易，乐成智能公众号，财联社，国金证券研究所整理



2.2 传输层决定器件性能下限，传统光伏设备企业在镀膜环节具有先发优势

在钙钛矿电池中，无论是电子传输层还是空穴传输层，其核心作用都是建立电荷输运通道并阻挡异种电荷传输。钙钛矿电池中所有的界面都与传输层关联，传输层材料设计的意义不仅是制备优质薄膜，更在于界面匹配和钝化修饰。晶硅电池结构虽然也涉及较多界面，但本质还是相同且稳定的硅材料。钙钛矿电池采用丰富且完全不相关的材料体系，界面适配度大大降低，因此在材料体系的发展较为成熟后，表界面工程在提高器件性能和长期稳定性方面发挥着越来越重要的作用。

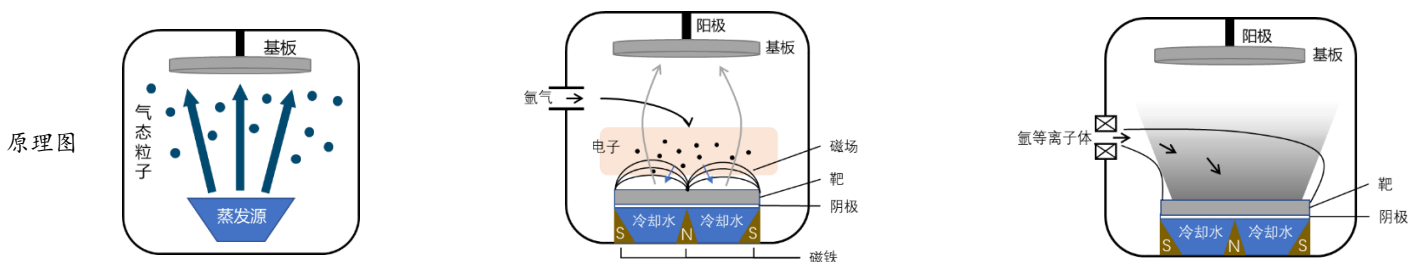
真空环境下的物理沉积是电子传输层、空穴传输层及电极制备的主流技术，俗称 PVD（物理气相沉积）。

PVD 根据反应方式不同，可以细分为真空蒸镀、磁控溅射和离子镀膜（RPD）。真空蒸镀是在真空条件下，加热靶材使其蒸发或升华，最后冷凝在衬底表面形成薄膜，设备简单、易操作，是目前最为成熟的物理气相沉积工艺。磁控溅射是通过氩离子撞击靶材，传递能量使靶材原子溢出，并在电场作用下沉积在衬底上形成薄膜，可以完成大面积镀膜需求，且膜层均匀性较好，是传输层和电极制备的主要选择工艺。RPD（反应式等离子体镀膜）也是利用氩离子轰击靶材，与磁控不同的是，RPD 的氩离子直接由等离子枪发射（磁控通过控制电子与空间中的氩气碰撞产生氩离子），与衬底保持了一定的距离，直接轰击衬底的概率大幅降低，并且等离子体能量较低，对衬底材料的损伤小，这一优点使它适用于钙钛矿上方的传输层制备，RPD 工艺段根据钙钛矿结构灵活可调传输层种类，并不局限于仅电子或者空穴传输层可用，以此减少对钙钛矿吸光层的伤害。

钙钛矿传输层制备还提出了一种原子层沉积技术（ALD），是一种可以将物质以单原子堆积形式一层一层镀在基底表面形成一定厚度薄膜的方法。从原理上 ALD 通过化学反应得到生成物，与化学气相沉积（CVD）类似；从沉积过程看 ALD 依靠不同的反应前驱物以气体脉冲的形式交替送入反应室中，与物理气相沉积（PVD）类似。原子层沉积技术以原子为单位，可以精确控制薄膜厚度和纯度，然而这种沉积方式也使 ALD 生长薄膜的速度非常缓慢，一般被用在需要精确控制薄膜的工艺。目前行业中微纳纳米在钙钛矿领域使用 ALD 工艺，2023 年 11 月公司公众号报道，其自主研发的钙钛矿晶硅叠层电池 ALD 专用量产设备顺利通过海外客户验收，帮助客户达成商业化电池（258.15cm²）最新世界记录效率。

图表20：PVD 具体工艺对比

	真空蒸镀	磁控溅射	RPD
原理	在真空条件下，采用一定的加热蒸发方式蒸发镀膜材料表面凝聚成膜的工艺方法。	电子在电场和磁场的共同作用下，与氩气原子发生碰撞，使其电离产生出 Ar ⁺ 和新的电子；新电子继续与氩气原子碰撞，Ar ⁺ 在电场作用下飞向阴极靶，并在撞击时将能量传递给靶材原子，使其从表面溢出，在电场作用下沉积到基片上。	氩气通过等离子枪形成等离子体，在磁场诱导下轰击靶材，靶材原子沉积到具有一定温度的衬底上形成薄膜。
优点	1. 设备简单，容易操作。 2. 形成机制简单明了。 3. 膜厚可控。	1. 方便实现工业化，可在大面积基底上获得均匀性很好的薄膜。 2. 精准控制膜厚。 3. 低温工作环境。 4. 薄膜纯度高、致密性好。	1. 基板损伤小。 2. 薄膜质量好、致密均匀。
缺点	1. 薄膜均匀性差。 2. 薄膜质量不高。	1. 靶材利用率低，成本高。 2. 破坏基板。	1. 大规模量产需要平行放置较多靶材，设备面积增大。 2. 靶材利用率较低，成本提高。



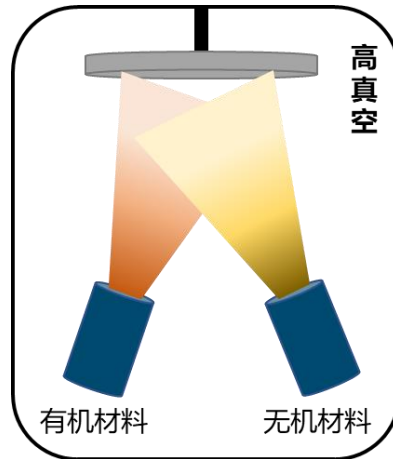
来源：微纳百科，国际太阳能光伏网，国金证券研究所绘制

气相沉积除了可以制作传输层和电极外，也是钙钛矿吸光层的生长手段之一。钙钛矿干法制备采用真空蒸镀工艺，将合成钙钛矿的材料在高真空下按一定的蒸发源束流加热蒸发，多种气态物质相遇并发生化学反应形成钙钛矿材料，最



后沉积到基底表面形成薄膜，是一种化学方法。这一过程中，晶体的生长过程与衬底温度、真空度以及衬底固有的表面特性和形貌等密切相关。通常将有机材料（MAI、FAI）和无机材料（ PbI_2 、 $PbCl_2$ 、 CsI ）共同蒸发，制备出杂质缺陷少，结构致密，一定范围内均匀性良好的高质量钙钛矿薄膜。真空蒸镀技术常用于显示领域镀膜，而钙钛矿材料不仅可以作为光伏电池吸光层，也被认为是下一代显示、照明领域的重要发光材料，因此不乏显示、LED 领域设备企业研发用于钙钛矿太阳能电池的蒸镀设备。然而蒸镀法工序简单，但薄膜质量不高，对设备真空度要求严格，能耗需求大，设备投资成本高，直接沿用显示领域经验应对光伏产业化规模和节拍难以避免水土不服，需要相关企业进行有针对性的工艺优化。

图表21：钙钛矿材料真空蒸镀示意图



来源：《Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition》，国金证券研究所绘制

光伏设备企业对物理气相沉积工艺并不陌生，晶硅电池发展到 N 型时代，TOPCon、HJT 等技术对镀膜已经提出了较高要求，优质的薄膜及其界面一定是太阳能电池提效的趋势之一。在晶硅电池中拥有成熟的镀膜技术的设备企业也在早前纷纷布局钙钛矿镀膜工艺，包括捷佳伟创、迈为股份、京山轻机等；还有一部分显示、LED 领域的设备厂商也入局钙钛矿，如奥来德、合肥欣奕华。

图表22：镀膜环节设备企业进展

公司	主要镀膜设备选型	钙钛矿进展
捷佳伟创	RPD	钙钛矿设备及服务订单金额超 2 亿，推出钙钛矿及叠层电池整线方案、五合一钙钛矿电池镀膜设备、涂布设备、激光划线设备等
迈为股份	-	对钙钛矿/晶硅叠层电池的研发和应用持续研发中
京山轻机	蒸镀 CVD	2022 年 6 月，钙钛矿团簇式多腔式蒸镀设备交付
奥来德	蒸镀	2022 年 11 月，投资 4900 万元建设钙钛矿结构型太阳能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。公司目前正在积极研发小型蒸镀机和钙钛矿蒸镀设备
合肥欣奕华	蒸镀 CVD	仁烁光能 150MW 产线 1.2m*0.6m 钙钛矿蒸镀机供应商。

来源：捷佳伟创公众号，京山轻机公众号，奥来德公司公告，合肥欣奕华公众号，深交所互动易，国金证券研究所

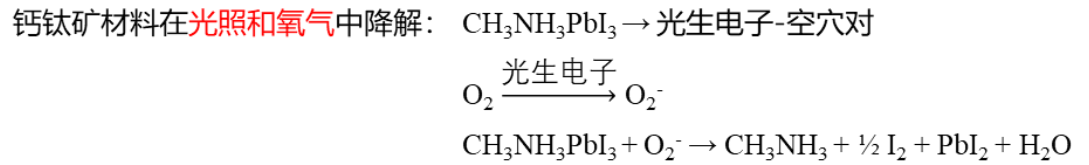
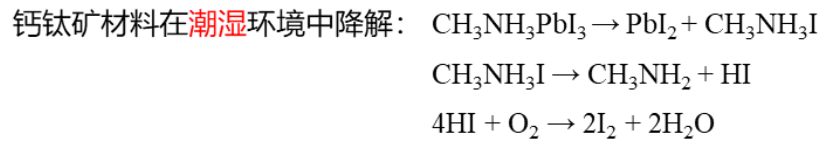
2.3 钙钛矿层决定器件效率上限，涂布设备核心零部件国产替代空间大

钙钛矿材料的一些本征性问题，使得薄膜质量决定了电池光电性能的天花板。主要的制约来自：

- 1) 薄膜缺陷多：在钙钛矿材料生长过程中，其固有的软晶格结构、有机组分的不稳定性等，不可避免地会在材料体内产生大量缺陷。这些缺陷不仅会影响太阳能电池的光电性能，还会进一步恶化钙钛矿材料的稳定性。
- 2) 材料稳定性差：钙钛矿材料在水氧、紫外光照、高温条件下均存在严重的退化现象，难以实现稳定输出。
- 3) 化学试剂带毒性：电池制备中用到含铅强毒性有机溶剂，电池运行老化降解会产生水溶性致癌物质 PbI_2 ，对生态安全和人类生存造成较大威胁。因此低毒性的锡基钙钛矿被认为是目前最有效的替代品，然而锡的稳定性差，对器件的商业化应用提出了较大挑战。
- 4) 难以大面积制备：在大面积衬底上制备致密、结晶度高、均一性好的吸光层薄膜是制约钙钛矿太阳能电池发展的一个重要因素。薄膜质量决定了电池的光电性能，现阶段钙钛矿光伏电池的较高效率基本是在 $\sim 1cm^2$ 的小面积上取得的，一旦面积增大，效率指数级下降。传统钙钛矿溶胶中胶粒尺寸不一、结晶速度快、工艺窗口窄，导致大面积薄膜均一性差、重复性差。



图表23: 钙钛矿材料稳定性差

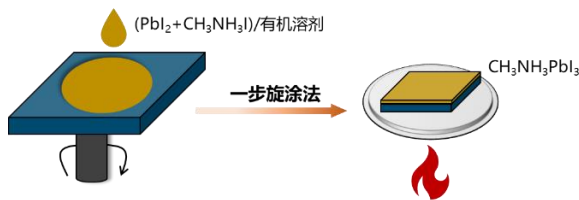


来源：《钙钛矿太阳能电池的活性层掺杂改性及界面修饰研究》，国金证券研究所

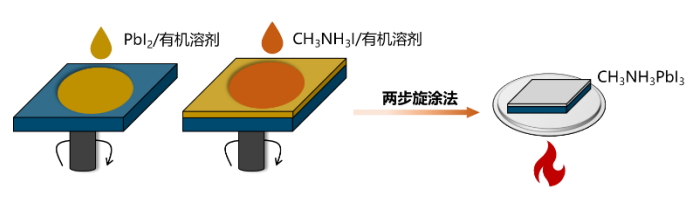
通过调节钙钛矿材料的组分，可以优化钙钛矿薄膜的形貌、结晶程度，更好地匹配界面能级，从而获得稳定高效的钙钛矿太阳能电池。在N型晶硅时代，HJT电池很明确地以N型单晶硅为基底，前场和后场材料从非晶向微晶转变，然而在钙钛矿时代，功能层方案本身就是丰富且灵活的，钙钛矿薄膜材料更迭的路线将是多元化的。

在钙钛矿材料选型并未完全确定的情况下，溶液法制备是成本低廉、方便配方调整的适配工艺。钙钛矿薄膜制备根据是否适用溶液分为湿法和干法，干法即上文提到的真空气相沉积法。实验室常用湿法制备，细分为一步旋涂法和两步旋涂法。简单来说，一步法是先先将钙钛矿材料对应溶液配置好，再旋涂到衬底表面，最后通过退火固化；两步法是将可以融合成钙钛矿的各原材料溶液依次涂覆到衬底表面，在衬底表面发生化学反应，形成薄膜。

图表24: 一步旋涂法示意图



图表25: 两步旋涂法示意图



来源：《高效稳定钙钛矿及钙钛矿/硅叠层太阳能电池制备及性能研究》，国金证券研究所绘制

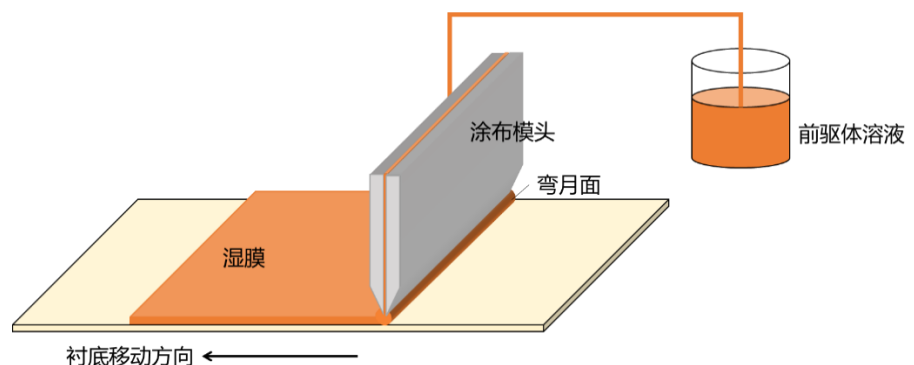
来源：《高效稳定钙钛矿及钙钛矿/硅叠层太阳能电池制备及性能研究》，国金证券研究所绘制

实验室研发的电池尺寸多为厘米量级，要想获得工业级的大面积钙钛矿薄膜，还要从科研领域广泛使用的旋涂法中总结规律并转化为高通量的涂布技术，探索高度结晶、均匀、致密的大面积钙钛矿薄膜制备工艺是获得高效太阳能电池的前提，也是钙钛矿电池商业化量产的必经之路。

生产大面积钙钛矿电池的涂布技术包括刮涂法、狭缝涂布法、喷涂法、喷墨印刷等。目前刮涂法制备的薄膜质量较低，喷涂法对喷嘴设计及工艺过程中的各参数要求较高，喷墨打印法仍需克服与萃取步骤不匹配的问题，因此狭缝涂布法是当前钙钛矿涂布设备厂商首选工艺类型。

狭缝涂布是将钙钛矿前驱体墨水储存在储液泵中，通过控制系统设定参数将其均匀地从狭缝涂布头中连续挤压到衬底上以形成均匀、连续的钙钛矿膜液的一种工艺方法。狭缝涂布法是无接触式的液膜制备过程，可以避免因衬底不平整而导致的涂布头与衬底刮擦的弊端。

图表26: 狭缝涂布示意图



来源：《Slot-die coating of perovskite solar cells: An overview》，国金证券研究所绘制



狭缝涂布法与刮涂法的主要区别在于涂布工具不同，涂布头是狭缝涂布设备的核心零部件。在钙钛矿光伏电池的涂布多为平板类基材，对温度、粉尘、气泡、洁净等要求严格，前驱体墨水为非牛顿流体、粘度低，为了获得高质量的钙钛矿薄膜，涂布模头的设计与开发涵盖流体力学、生产工艺特性、流体仿真分析、机械设计、材料学、电控软控和复杂算法等多学科，具有较高的技术壁垒。目前狭缝式涂布模头领域，国外的主要厂家为日本三菱、日本松下和美国 EDI，国内主要厂家包括曼恩斯特、东莞海翔、东莞施立曼和东莞松井，国内企业中仅曼恩斯特布局钙钛矿涂布技术。

图表27: 钙钛矿涂布设备企业进展

公司	设备进展
捷佳伟创	三款狭缝涂布设备，满足研发、单结量产、叠层量产需求
曼恩斯特	2023年7月拿下钙钛矿领域狭缝涂布机首单，基板尺寸1200*600mm
德沪涂膜	2023年8月，2台钙钛矿核心涂膜设备验收交付，再获100MW钙钛矿量产线大尺寸高精度涂膜设备订单。
众能光电	2023年4月推出1100mm*1300mm大面积高精度狭缝涂布机
大正微纳	2023SNEC展会上展示了两台高精度狭缝涂布设备。

来源：曼恩斯特公众号，德沪涂布公众号，众能光电公众号，大正微纳公众号，2023年11月捷佳创新品发布会，国金证券研究所整理

在实际的生产实践中，钙钛矿组件研发商们针对各自的配方，基于涂布法和蒸镀法，形成了自己独有的钙钛矿吸光层工艺。极电光能采用干法搭骨架、湿法定结晶的“原位固膜”技术；协鑫光电采用涂布法，但在后续的结晶步骤上采用了自主开发的设备，实现高均匀性和可重复性；纤纳光电采用独立开发的溶液打印技术制备钙钛矿薄膜；万度光能介观钙钛矿层采用丝网印刷工艺。

图表28: 各厂商工艺路线选择

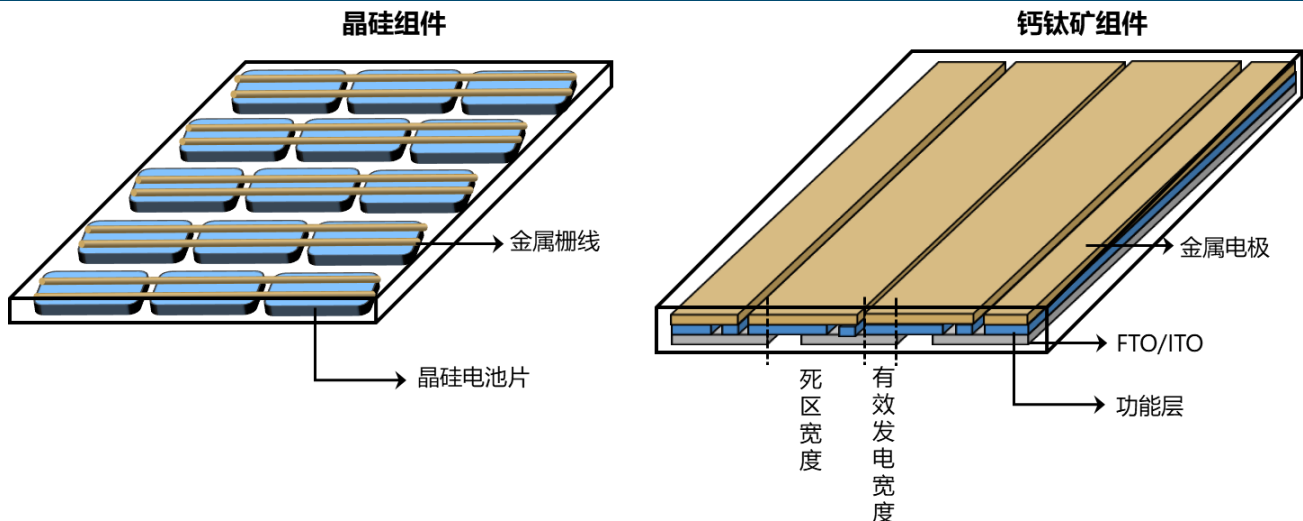
厂商	钙钛矿吸光层工艺
极电光能	干法+湿法
协鑫光电	涂布法
纤纳光电	溶液打印
万度光能	丝网印刷
大正微纳	溶液法卷对卷工艺
仁烁光能	涂布法

来源：仁烁光能公众号，弗思迈智能科技公众号，36氪，经纬创投，极电光能，大正微纳公众号，国金证券研究所

2.4 封装环节技术要求提高，独特组件结构颠覆晶硅路线

不同于晶硅电池，钙钛矿太阳能制造环节完全且必须实现电池、组件一体化，这是材料和结构共同导致的。一方面，材料的不稳定性不支持钙钛矿电池在制作后长期存放、长途运输。另一方面，现在常见的2278 mm*1134 mm晶硅组件由144片182 mm*182 mm尺寸的半片电池组成，纯钙钛矿电池在各功能层制造环节就以该级别的大面积形式进行，依靠激光刻划构成内部小电池串联的结构。

图表29: 晶硅组件与钙钛矿组件俯视图对比

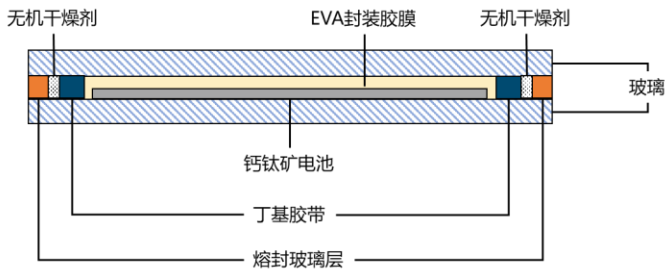


来源：德国乐普科，国金证券研究所绘制



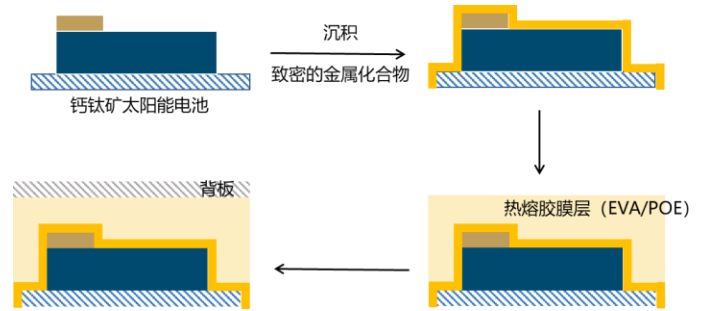
钙钛矿太阳能电池的激光工艺完全颠覆了传统的晶硅组件封装流程，使组件环节的关注点从焊接方式前置为封装结构。钙钛矿太阳能电池的封装结构基本可以分为两类，一类是先胶膜包覆住电池，外部叠加丁基胶、具有干燥功能的材料，最后选择玻璃、石蜡等可以完全隔绝空气的材料与上下玻璃基板构成密闭空间；第二类是用物理沉积的方式先在电池表面沉积无机材料（金属氧化物、非金属氧化物、共价化合物等）作为阻氧层，再覆盖有机材料隔绝水汽，形成良好的水汽阻挡结构。

图表30：胶膜封装方案示意图



来源：协鑫光电专利 202123362925，国金证券研究所绘制

图表31：物理沉积封装方案示意图



来源：协鑫光电专利 202122293792，国金证券研究所绘制

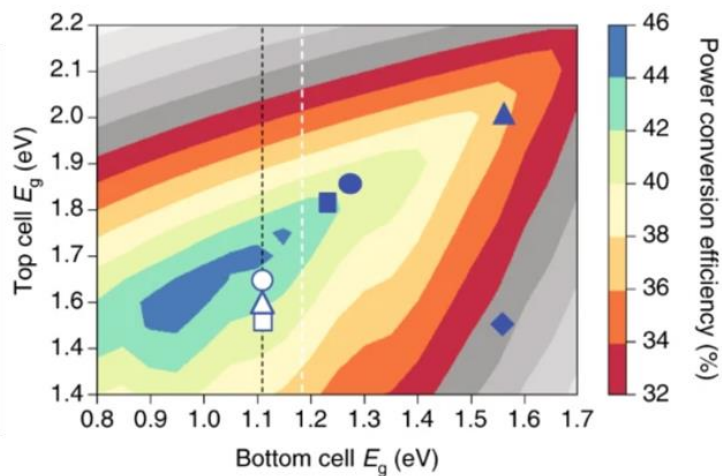
3、钙钛矿叠层技术持续推进，或将成为终极电池工艺的产业共赢方案

3.1 钙钛矿-晶硅叠层电池，光能极致利用技术

无论选择哪种基础材料，哪种钝化技术，太阳能电池技术的发展方向可以概括为“把光学吸收功能全部收纳于本征活性层，把电学传输功能全部收纳于载流子传输层”。因此，基于太阳光谱的光子吸收原理，研究人员提出多功能层堆叠结构，力图打破单一简单 pn 结和材料对转换效率的物理限制，进一步降低光伏系统的平准化度电成本（LCOE）。

根据 SCI 论文《Opportunities and challenges for tandem solar cells using metal halide perovskite semiconductors》中的计算，晶硅电池带隙~1.1eV，与带隙范围 1.6-1.75eV 的钙钛矿搭配，可以实现接近 44% 的理论极限效率。这种电池串联方式，投入极少的钙钛矿成本，不需要显著增加成本，不需要改变现有晶硅产业链，就可以打破现有光伏产品的效率壁垒，成为学术界和产业界研究的焦点。钙钛矿-晶硅叠层电池即是钙钛矿光伏产业化最直接的途径，也是晶硅电池效率快速提升的途径之一。从牛津大学研究团队的钙钛矿-晶硅叠层电池在 2016 年首次获得 23.6% 的效率认证，到隆基在 2023 年 9 月实现 33.9% 的转换效率世界纪录，钙钛矿与晶硅电池的组合展现出惊人的提效潜力。

图表32：钙钛矿与晶硅能隙组合接近最优理论极限效率

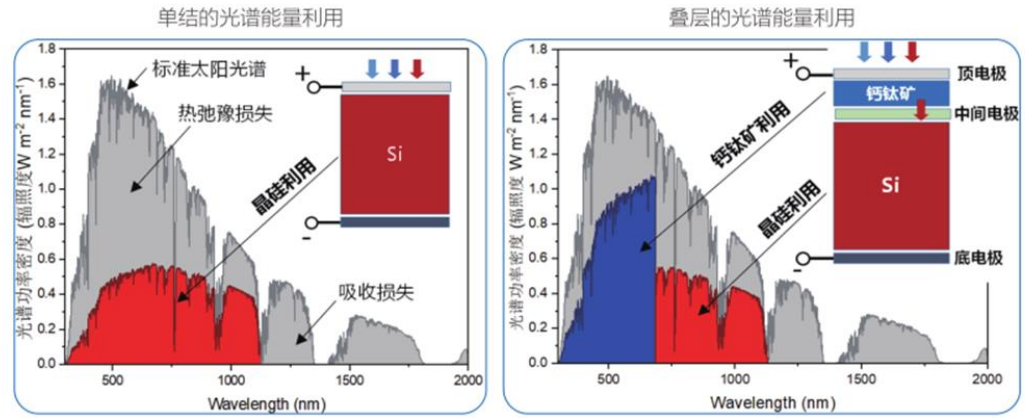


来源：《Opportunities and challenges for tandem solar cells using metal halide perovskite semiconductors》，国金证券研究所（白线虚线：钙钛矿材料目前可获得的最低带隙；黑色虚线：硅材料带隙 1.12eV；实线符号：迄今为止用于制造钙钛矿-钙钛矿叠层电池的带隙组合；空心符号：两端钙钛矿-晶硅叠层电池最佳带隙组合。



钙钛矿-晶硅叠层太阳能电池本质是一种半导体串联器件，利用钙钛矿材料和硅材料的带隙不同，扩宽光吸收范围，提高光照利用率，获得突破晶硅极限的光电转换效率。通常顶部为宽带隙电池吸收高能光子（钙钛矿电池），底部为窄带隙太阳能电池吸收低能光子（晶硅电池），实现太阳光谱的最大利用，减轻能量不匹配的载流子热损失。

图表33: 叠层电池光谱能量利用率提高

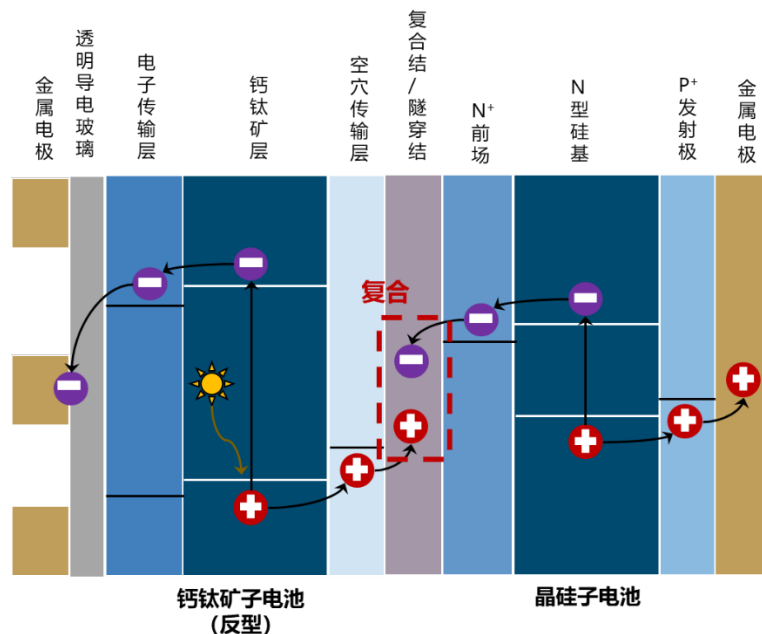


来源：中国科学技术大学碳中和研究院，国金证券研究所

根据输出端数目，叠层太阳能电池可以分为两端、三端和四端结构。其中，钙钛矿-晶硅叠层的两端器件具有最简洁的工艺和相对低廉的成本，符合叠层电池的产业化前提。

两端叠层电池是将晶硅子电池和钙钛矿子电池通过复合结（隧穿结）过渡，两个子电池极性相异的一端串联在一起，为了使两端电极接收到不同类型的载流子，钙钛矿子电池选型多为反式结构。两端钙钛矿-晶硅叠层电池只需要一层透明导电电极，可以减少沉积步骤及材料的使用，降低生产成本，并且减少透明导电薄膜造成的光寄生吸收损失。两端叠层电池的开路电压等于两个子电池的开路电压之和，较高的开路电压可以有效减少整个电池系统因串联电阻带来的损失。但也面临一些问题，1) 整体电池的电流密度不等于两子电池之和，而是受最小电流密度的子电池限制，这要求两个子电子电流密度匹配，否则适配电流产生的热量积累会导致钙钛矿材料寿命缩短。2) 电流密度和天气、时间等条件要尽可能匹配，但全球各地太阳光谱各有差异，难以避免不同地区在实际发电过程中的发电量损失。3) 两个子电池制备工艺必须尽可能兼容，例如在晶硅子电池上方制作钙钛矿子电池，则钙钛矿薄膜的生长温度必须低于晶硅电池的工艺温度。

图表34: 钙钛矿子电池在两端叠层中多选择反式结构



来源：《Polycrystalline silicon tunnelling recombination layers for high-efficiency perovskite/tunnel oxide passivating contact tandem solar cells》，国金证券研究所绘制

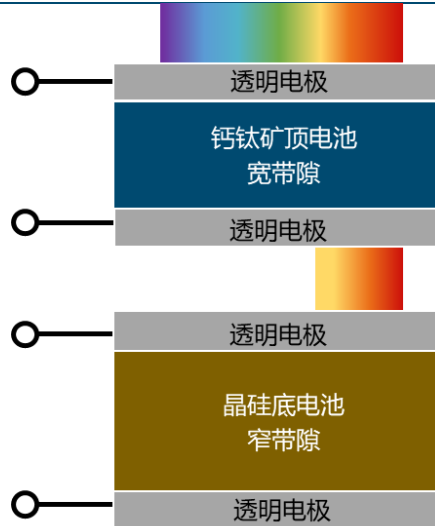
三端电池的结构配置方案分为插指背接触式和复合结位式。三端钙钛矿-晶硅叠层电池即有三个输出端口，相比两端，多出的一端可以有效利用失配电流密度，最大化输出能量。三端插指背接触式串联电池由一个插指式结构的晶硅底电



池和宽带隙钙钛矿顶电池组成，三端复合位式串联太阳电池的三个输出位除了传统的顶底两端外，第三端位于复合结位置，利用电路开关转换进行失配电流密度的二次利用。这种结构继承了两端电池的全部优势，且三个电极端可以同时制作，简化工艺，在三端配置中被研究者们看好。然而这种结构下，电路开关的切换频繁且复杂，失配电流密度二次利用率并不高。

四端钙钛矿-晶硅叠层共有三类，四端输出避免断路，大大提高子电池组合的容错率。物理堆垛式串联电池结构中，两子电池独立制备，电学上彼此独立，光学上相互耦合，也可以说是钙钛矿组件和晶硅组件竖直叠放，两个组件电流密度无需匹配，且工艺条件互不限制。四个电极中，至少要保证三个电极具备高光学透过率和低寄生吸收损耗，对金属电极和封装材料的要求增加。四端反射聚光式和分光反射式串联电池都应用到技术含量较高的光学镜片，根据不同电池的太阳光吸收范围进行光学结构设计，确保子电池吸收对应波长的光。这两种结构虽然可以通过减少复杂结构的电学损失，但全制造成本、难度都大幅增加。

图表35：钙钛矿组件-晶硅组件构成四端物理堆垛式叠层结构



来源：《Perovskite/silicon tandem solar cells: marriage of convenience or true love story? — An overview》，国金证券研究所绘制

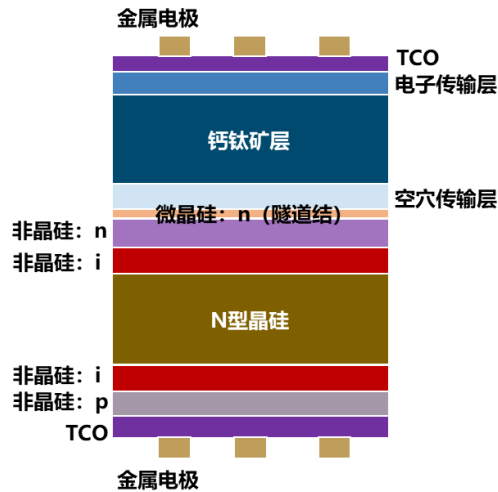
3.2 HJT、TOPCon 电池均可以与钙钛矿结合为叠层电池，研发效率持续提升

钙钛矿-晶硅叠层电池的研究多集中于 HJT 技术，目前全球有 4 个研究单位认证效率超过 30%（洛桑联邦理工学院/瑞士电子与微技术中心 31.3%；德国赫姆霍兹研究中心 32.5%；阿卜杜拉国王科技大学 33.7%；隆基 33.9%）。2023 年 6 月，隆基绿能在商业级绒面 GZ 硅片上实现钙钛矿-晶硅叠层电池 33.5% 的转换效率，获得欧洲太阳能测试机构 ESTI 权威认证。HJT 之所以被认为是钙钛矿叠层电池的最优解，一是 HJT 电池具有较高的开路电压和填充因子，根据两端叠层电池开路电压等于两子电池之和的原理，钙钛矿-HJT 叠层性能最优；二是 HJT 同样使用 TCO 做电极，且工序简单，升级为叠层需要进行的产线改造少、难度较低；三是 HJT 是低温制程，除了晶硅衬底外，其他功能层也同样是纳米量级厚度的薄膜，无论从材料自身还是制备工艺上都与钙钛矿具有一致性。

但钙钛矿-HJT 叠层电池的进展并非一帆风顺。根据国际光伏技术路线图确定的晶硅电池改进方向，如受光面金属接触、前后表面钝化、硅片减薄和最大化减反技术，光学层面的优化将成为技术发展和降低成本的关键。根据光学模拟研究（HoBailie 团队），钙钛矿-HJT 叠层电池由反射引起的光学损失超过 17%，一方面 HJT 硅衬底的平整形貌极大地损失了电池效率，钙钛矿-HJT 叠层电池必然要由平面结构走向绒面结构；另一方面钙钛矿顶电极的各类材料是光学寄生吸收的主要来源，这意味着除了钙钛矿本征吸收层外，其他所有功能层都仍需要更多的工艺优化去减少寄生吸收。



图表36: 钙钛矿-HJT 叠层结构示意图



来源: 捷佳伟创, 沙特阿卜杜拉国王科技大学 刘江 博士, 国金证券研究所绘制

图表37: 钙钛矿-HJT 叠层电池布局厂商最新进展

公司	电池性能	进展
隆基绿能	33.90%	钙钛矿叠层电池世界记录保持者, 拥有钙钛矿相关专利 39 项。
通威股份	31.68%	已组建钙钛矿叠层电池实验室, 基于大绒面的两步法钙钛矿/硅叠层电池效率已达到 31.68%
爱旭股份	-	布局专利“一种异质结钙钛矿太阳能叠层电池”。
爱康科技	-	投资 10 亿元在杭州建设 HJT 钙钛矿叠层电池研究及生产基地项目。
华晟新能源	-	2023 年 11 月, C 轮融资超 20 亿元, 用于华晟高效异质结产品的持续扩产, 以及对于异质结-钙钛矿叠层电池等前沿技术的研发。预计 2025 年前后, 叠层电池中试线正式投入使用, 中试线电池片平均效率将达到 28%-30%; 目标在 2025-2027 年间, 实现“钙钛矿+异质结”的产业化。
仁烁光能	27.90%	公司高度关注并持续推进包括钙钛矿技术在内的各类新型电池技术, 已组建钙钛矿叠层电池实验室, 基于大绒面的两步法钙钛矿/硅叠层电池效率已达到 31.68%, 处于行业领先水平。
宝馨光能	32.00%	2023 年 5 月, 公司与江苏迪塔镁克、嘉兴科民电子就钙钛矿/异质结实验线用 PVD、ALD、涂布设备签订了采购协议和战略合作。
曜能科技	33.14%	商业级 M6 规格钙钛矿/晶硅串联叠层电池组件转换效率达到 25.45%, 是公司规划建设百兆瓦级中试验证生产线的重要起点。
合特光电	-	异质结钙钛矿中试线所需的各类设备已安装就位, 目前进行设备、工艺的调试及优化工作。

来源: 隆基绿能公众号, 国家专利局, 公司公告, 曜能科技公众号, 宝馨光能公众号, 仁烁光能公众号, 上证 e 互动平台, 国金证券研究所整理

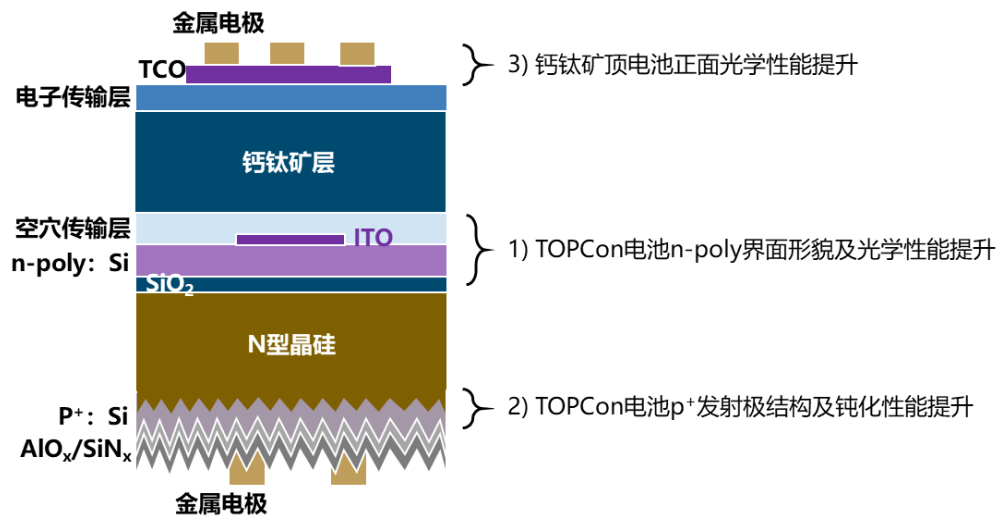
从物理本质看, TOPCon 和 HJT 是同源技术, 都是通过钝化减少载流子复合, 从而提高效率, 只是两者钝化的材料不同。过去, 以 TOPCon 作为底电池的钙钛矿叠层电池研究较少, 直到 2018 年澳大利亚研究团队将氧化硅/多晶硅钝化接触结构运用于叠层电池中并实现了 24.5% 的转换效率, 至此开启了钙钛矿-TOPCon 叠层电池的产业化尝试。

钙钛矿-TOPCon 叠层电池是在 TOPCon PN 结构上直接制作钙钛矿子电池, TOPCon 子电池结构与单结 TOPCon 相反, 原本受光的 p 面在下, n-poly 与钙钛矿子电池的电荷传输层相接, 而非与电极直接接触, 避免了金半接触界面带来的复合损失。并且 TOPCon 出色的高温稳定性, 可以为顶部钙钛矿电池各功能层材料选择提供更大的工艺窗口。

与 HJT 需要走向绒面结构不同的是, 钙钛矿-TOPCon 叠层电池需要去绒面化。TOPCon 的 n-poly 绒面结构粗糙度在微米量级, 而钙钛矿子电池是薄膜电池, 每一层的厚度基本在百纳米量级, 10 倍的厚度差足以严重影响钙钛矿各功能薄膜的质量和物理性能。因此通过工艺优化控制 n-poly 界面形貌, 并且匹配致密的钙钛矿传输层材料和高质量的钙钛矿膜层制备技术仍是钙钛矿-TOPCon 叠层电池持续提效所需要克服的关键问题。



图表38: 高效钙钛矿-TOPCon 叠层电池三大技术挑战



来源:《27.6% Perovskite/c-Si Tandem Solar Cells Using Industrial Fabricated TOPCon Device》, 晶科能源, 国金证券研究所

以晶科为首的头部大厂钙钛矿-TOPCon 叠层电池工艺一直走在行业内最为领先的水平。2023 年 11 月, 晶科能源通过开发新型中间复合叠层结构、钙钛矿体相钝化提升技术, 实现高传输通量、无迟滞效应的高效钙钛矿界面钝化技术, 钙钛矿-TOPCon 叠层电池转换效率达到 32.22%, 并获中科院微系统所认证。12 月, 协鑫光电钙钛矿叠层组件在大面积 (2048cm²) 上实现 26.34%, 获得中国计量科学研究院权威认证。此外, 中来股份、天合光能等公司也公开表示正在布局钙钛矿-TOPCon 叠层技术。

图表39: 钙钛矿-TOPCon 叠层电池市场动态

公司	电池性能	进展
晶科能源	32.22%	经中科院上海微系统所检测, 创造同类叠层电池的新效率纪录。
天合光能	28.50%	正在研发 i-TOPCon+钙钛矿叠层电池技术, 预判该技术路线可以将电池效率拉升至 30%以上。
中来股份	-	提前布局钙钛矿+TOPCon 电池叠层方向相关专利, 现阶段重点进行与钙钛矿电池相匹配的底层电池 (TOPCon) 的研发。
协鑫光电	26.34%	组件对组件的叠层, 先把大面积钙钛矿组件做出来, 再叠晶硅组件, 开创了一个全新的发展路径。

来源: 晶科能源公众号, 2023 SNEC, 协鑫光电公众号, 深交所互动易, 国金证券研究所

全钙钛矿叠层电池性能可设计性强, 有望应用于差异化场景。目前, 全钙钛矿叠层电池的最高认证效率达到 29% (南京大学 谭海仁团队)。相比钙钛矿-晶硅叠层, 钙钛矿-钙钛矿叠层电池具有独特的优势: 1) 固定资产投资更低, 两子电池需要的设备基本相似, 可以共享, 钙钛矿生产线即可满足; 2) 两端都为钙钛矿电池, 两子电池提效思路一致、对环境的敏感性一致、封装要求一致; 3) 全钙钛矿叠层电池可向柔性应用领域延伸。

但钙钛矿材料不如晶硅稳定, 因此全钙钛矿电池的稳定性考验极为严峻, 对两个不同带隙的钙钛矿吸光层结晶质量、光吸收特性和稳定性要求更加严格, 此外子电池间的界面接触层需要特殊设计, 以保证有效衔接, 并对底电池起到保护作用。

在目前市场中, 选择全钙钛矿叠层路线的仅仁烁光能。仁烁光能创始人是带领团队多次突破钙钛矿-钙钛矿叠层电池世界记录的南京大学谭海仁教授。2023 年 2 月, 仁烁光能建设的全球首条全钙钛矿叠层光伏组件 10MW 研发线跑通并正式投产, 先后 7 次打破转换效率的世界纪录。目前仁烁光能全钙钛矿叠层电池研发效率已实现 30%以上。



4、投资标的

针对钙钛矿电池产业化所带来的投资机会，我们认为目前看主要有 3 个方向：方向一是可以提供钙钛矿各类功能层制备所需的镀膜设备、涂布设备或是划分电池的关键激光设备厂商，重点推荐捷佳伟创、迈为股份、京山轻机，关注杰普特、德龙激光、曼恩斯特、德沪涂膜；方向二是有望受益于钙钛矿产业化所带来的封装体系变化的相关材料企业，重点推荐金晶科技，关注耀皮玻璃；第三个方向是钙钛矿产能布局相对领先的头部制造企业，重点推荐协鑫科技，关注隆基绿能、通威股份、晶科能源、纤纳光电、仁烁光能、极电光能。

图表40：重点推荐标的及值得关注的相关企业信息简介

环节	公司	上市进度	产品	亮点
设备厂商	捷佳伟创	已上市	钙钛矿整线设备	2023 年 11 月，公司新品发布会推出钙钛矿及叠层电池整线交钥匙方案。
	迈为股份	已上市	钙钛矿-HJT 整线设备	计划 2025 年建立量产线，2027 年 GW 级别量产，目标量产转换效率 31%。
	京山轻机	已上市	钙钛矿整线设备	目前公司可以提供 MW 级钙钛矿及整体解决方案和 GW 级钙钛矿量产装备输出与技术支持。
	杰普特	已上市	激光设备	P1-P3 整套激光划线设备在客户端实现持续批量生产，组件死区宽度稳定控制在 150 μm 以内。
	德龙激光	已上市	激光设备	首套钙钛矿薄膜太阳能电池生产整段设备（百兆瓦级）已顺利交付客户并实现业务收入。
	曼恩斯特	已上市	涂布模头	公司在钙钛矿太阳能电池已成功获得销售订单。
	德沪涂膜	未上市	涂布机	获百兆瓦设备订单。
封装材料企业	金晶科技	已上市	TCO 玻璃	TCO 产品继续保持在国内钙钛矿、碲化镉市场份额的领先优势。
	耀皮玻璃	已上市	TCO 玻璃	2023 年 5 月成功大批量生产碲化镉 TCO 玻璃并供货客户，成品率高于往年水平。
组件制造商	协鑫科技	已上市	钙钛矿及叠层组件	全球首个 GW 级大规格（2.4m×1.2m）钙钛矿生产基地奠基。
	子公司协鑫光电			
	隆基绿能	已上市	钙钛矿-晶硅叠层组件	钙钛矿叠层电池效率 33.9%，世界记录保持者。
	通威股份	已上市	钙钛矿-晶硅叠层组件	钙钛矿-HJT 叠层电池实验室效率 31.68%。
	晶科能源	已上市	钙钛矿-晶硅叠层组件	钙钛矿-TOPCon 叠层电池实验室效率 32.22%。
	纤纳光电	未上市	钙钛矿组件	库布其 200 万千瓦光伏治沙项目中 1MW 钙钛矿地面电站成功并网。
	仁烁光能	未上市	钙钛矿组件	1.2m*0.6m 的钙钛矿组件投产顺利，预计 2024 年内实现 20%以上转换效率。
极电光能	未上市	钙钛矿组件	2023 年 4 月，全球首条 1GW 钙钛矿光伏生产线、100 吨钙钛矿量子点生产线项目开工，计划 2024 年三季度投产，2025 年开始规模化销售。	

来源：协鑫科技公众号，ISFH，晶科能源公众号，纤纳光电公众号，极电光能公众号，捷佳伟创新品发布会，2023 年风光水储协同发展产业研讨会，京山轻机公司公告，杰普特公众号，德龙激光公司公告，德沪涂膜公众号，仁烁光能公众号，耀皮玻璃公司公告，曼恩斯特公司公告，金晶科技公司公告，国金证券研究所（加粗为重点推荐标的）

4.1 捷佳伟创：光伏电池设备平台型企业，已推出钙钛矿整线设备

捷佳伟创聚焦太阳能光伏行业，是一家拥有业内先进的太阳能电池装备研发、制造和生产供应能力的国家高新技术企业。主要产品包括湿法设备系列、真空设备系列、智能制造设备系列、晶体硅电池整线解决方案等。其中晶体硅整线解决方案包括 PERC、TOPCon、HJT、单节及叠层钙钛矿生产线等整体解决方案，是目前唯一一家具备多技术路线整线解决方案的设备供应商。

捷佳伟创 2018 年获日本住友中国大陆地区专门销售制造 RPD 设备的授权，全球仅日本住友、捷佳伟创、精曜科技（台湾）可制造，技术 know-how 多，壁垒高。公司在住友公司原技术上二次开发，根据市场需求，推出不同适配机型，深耕三年后，公司于 2021 年 10 月中标首个钙钛矿中试线设备采购订单。并从 2022 年下半年到 2023 年初，公司累计向十多家光伏头部企业和行业新兴企业、研究机构提供钙钛矿装备及服务超过 2 亿元人民币；2023 年 9 月五合一团簇



式钙钛矿叠层真空镀膜装备成功下线，革命性整合了 RPD、多源蒸镀、RF 溅射、脉冲直流溅射和直流溅射等多种技术，能够在真空环境下连续沉积各种薄膜，包括 TCO（透明导电电极）、Cu（金属电极）、SnO₂（电子传输层）、NiO（空穴传输层）。

图表41：2023 年捷佳伟创设备在钙钛矿领域快速发展

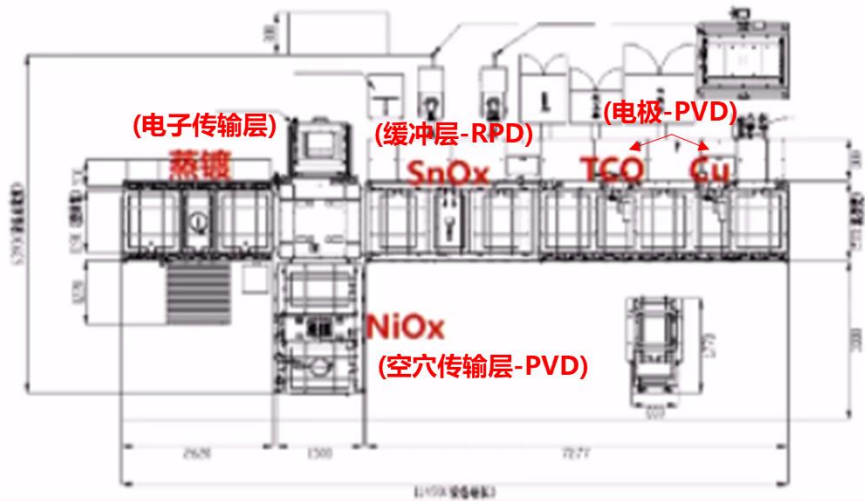


来源：捷佳伟创公众号，国金证券研究所绘制

2023 年 11 月，公司新品发布会推出钙钛矿及叠层电池整线交钥匙方案，整线产品持续覆盖客户钙钛矿产业化进展全周期：1) 钙钛矿电池研发线，可兼容 450mm*650mm 及以下面积单结钙钛矿电池、210/182 整片的叠层钙钛矿电池。2) 百兆瓦钙钛矿薄膜电池量产线，目前共有两个主流规格，0.6m*1.2m 符合传统薄膜太阳能电池经典尺寸，1.2m*2.4m 满足晶硅电池统一尺寸(1134mm*2382mm)。3) 百兆瓦钙钛矿叠层电池量产线，210 半片规格下产能可以达到 2800 片/小时。

细分环节产品看，公司推出 5 合 1 钙钛矿电池镀膜设备，将蒸镀、RPD、PVD 整合在一台设备中，满足钙钛矿电池所有镀膜需求，兼容 210/182 整片设备，成本下降 28%，厂房面积需求减少 33%。钙钛矿电池涂布设备采用狭缝涂布技术，共有三个型号可用于研发、单结量产和叠层量产，薄膜厚度百纳米~微米级可调，膜厚均一性≤±5%，采用独特的高压主流输电（HVCD）实现快速成核之结晶功能。钙钛矿电池激光设备分为小尺寸和量产型两种规格，集成 P1-4 工艺，划线直线度±5um，划线速度 2000mm/s，线宽 20-50um 可调。

图表42：捷佳伟创 5 in 1 钙钛矿镀膜设备工作区俯视图



来源：捷佳伟创新品发布会，国金证券研究所

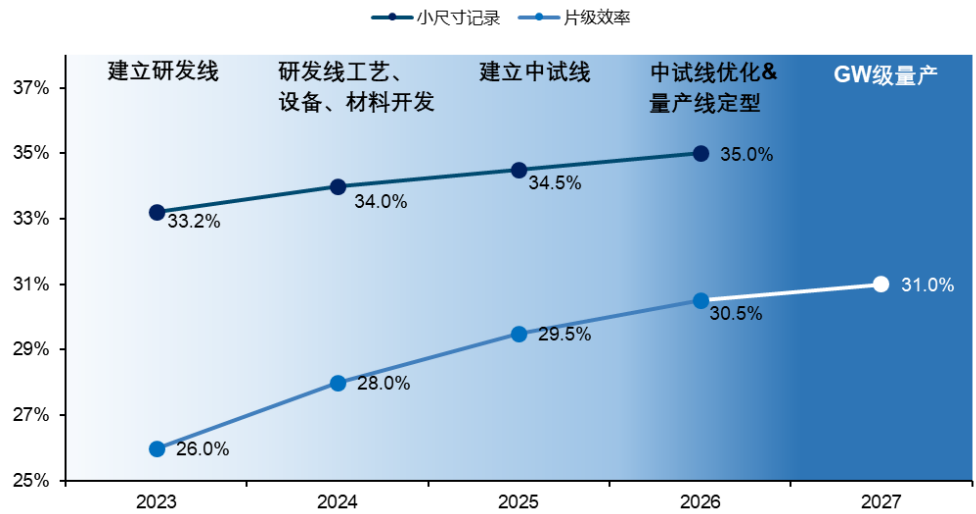
4.2 迈为股份：泛半导体领域高端装备制造商

公司成立于 2010 年 9 月成立，是一家集机械设计、电气研制、软件开发、精密制造于一体的高端装备制造商，面向太阳能光伏、显示、半导体三大行业，研发、制造、销售智能化高端装备。公司立足真空、激光、精密装备三大关键技术平台，以自主研发与技术创新实现核心设备国产化。

公司作为 HJT 整线设备龙头，具有行业领先的薄膜沉积工艺，在钙钛矿-HJT 叠层电池镀膜环节有望延续优势。公司在 2023 年中期业绩交流会上表示，异质结叠层是未来主赛道，异质结产业化三部曲将从异质结产业化、异质结+铜电镀产业化到异质结+钙钛矿产业化。2023 年风光水储协同发展产业研讨会上，迈为股份计划在 2023 年底准备 2MW 试验线，2025 年建立量产线，2026 年中试线定型，2027 年 GW 级别量产，目标量产转换效率 31%。



图表43: 迈为钙钛矿-HJT 叠层整线设备规划



来源：风光水储协同发展研讨会，国金证券研究所

4.3 金晶科技：国内超白玻璃龙头，布局绿色建筑、绿色能源两大赛道

金晶科技前身系山东玻璃总公司全资附属企业淄博金晶浮法玻璃厂，2002 年在上交所上市。公司以玻璃、纯碱及其延伸产品的开发、生产、加工、经营为主业，进军太阳能新材料等领域。TCO 玻璃是单结钙钛矿电池制备的基底材料，并作为电极输出电流，在钙钛矿全电池材料体系中具有重要的地位。

根据公司公告，全资子公司金晶科技马来西亚公司投资建设的 600 吨/天薄膜光伏组件玻璃生产线（二期）于 2023 年 5 月 18 日成功点火，年产能 3000 万平方米；全资孙公司滕州金晶玻璃二线 600 吨/天玻璃生产线升级改造为 TCO 玻璃产线项目于 2023 年 9 月 8 日成功点火，公司 TCO 玻璃产能达到 4500 万平米/年。

公司 TCO 产品继续保持在国内钙钛矿、碲化镉市场份额的领先优势。2022 年内国内具备中试线能力的碲化镉、钙钛矿客户均已确认公司在线 TCO 产品性能，并建立了商务关系。2022 年 10 月，公司与纤纳光电达成战略合作，未来纤纳光电每增加 1GW 的钙钛矿电池产能规划，在甲乙双方就阶段性采购数量达成共识的情况下，金晶科技需配套不低于 500 万平米/年 TCO 玻璃产能。此外，协鑫光电高度认可公司 TCO 导电玻璃质量及快速迭代能力，双方对钙钛矿未来的产业发展充满期待，有意通过加强技术交流，早日实现钙钛矿 GW 级产线建设。

4.4 京山轻机：国际化智能装备制造企业，深化钙钛矿设备布局

京山轻机成立于 1957 年，公司历史悠久，依靠 40 多年在工业制造的应用实践经验、工艺沉淀，从包装机械制造领域扩展到非标自动化、新能源等多个领域的装备制造，逐步打造形成京山轻机智能装备制造生态圈。公司全资子公司晟成光伏主要从事光伏行业智能化装备的研发、制造、销售及服务，为客户提供整套生产线的解决方案，是光伏行业组件设备的主要供应商。

公司是业内较早完成钙钛矿设备开发且有实际产品销售的企业。2020 年，公司募集资金 8100.00 万元，用于研发制备异质结和钙钛矿叠层电池的核心设备，项目总投资 1.26 亿元。截至 2023 年 11 月 30 日，该项目累计使用募集资金 5479.56 万元，该项目预定可使用状态日期为 2024 年 6 月 30 日。目前公司可以提供 MW 级钙钛矿及整体解决方案和 GW 级钙钛矿量产装备输出与技术支持。同时，公司拥有丰富的技术储备，产品矩阵在不断的优化和完善中。



图表44：公司钙钛矿及叠层电池组件主要产品

类型	整线设备	规格
GW 级钙钛矿量产装备	核心工艺设备：玻璃清洗设备、背玻清洗设备，空穴层 PVD 镀膜设备，透明导电层 PVD 镀膜设备，超声波滚压焊接机，丁基胶涂覆机，汇流带贴敷机，封装整线设备等。	兼容长(2000~2300mm)×宽(1000~1200mm)的钙钛矿电池生产需求。
MW 级钙钛矿高效电池制造整体解决方案	整线工艺设备：玻璃清洗机、立式 PVD (NiO/ITO/Cu 等)、激光划线 (P1/P4)、激光划线 (P2/P3)、手套箱配液区、涂布干燥结晶一体机 (双工站涂布机 PVK/ETL)、空间原子层沉积 (SnO ₂)、半自动层压机、PL/EL/IV 测试机等。整线配备 MES 系统智能管理。	兼容长 (400~1200mm) × 宽 (300~600mm) 的钙钛矿电池生产需求。
钙钛矿 / 叠层电池实验线	整线工艺设备：超声波清洗机、等离子体处理设备、三腔 PVD (NiO/ITO/Cu 等)、激光划线 (P1~P4)、手套箱配液区、涂布干燥结晶一体机 (双工站涂布机 PVK/ETL)、团簇多功能蒸镀机 (PVK/ETL)、半自动丝网印刷机、半自动层压机、PL/EL/IV 测试机等。	兼容长 (25~210mm) × 宽 (25~210mm) 的钙钛矿及叠层电池生产需求。
钙钛矿组件自动封装线	整线工艺设备：上玻璃机、超声波汇流条焊接机、贴导电胶带机、美容纸贴敷机、丁基胶涂敷机、胶膜裁切铺设机、双玻合片机、堆栈机、层压机、接线盒焊接机、固化线、自动化传输设备、测试区 (包含 IV、EL、绝缘耐压测试设备)、分档机等。	兼容长 (2000~2300mm) × 宽 (900~1200mm) 的组件生产需求。

来源：公司公告，国金证券研究所

4.5 协鑫科技：钙钛矿组件制造商，GW 级产线建设进行时

协鑫科技成立于 2006 年，是全球领先的高效光伏材料研发和制造商；协鑫集团 2016 年收购厦门惟华（协鑫光电前身），2019 年正式成立协鑫光电，专注于钙钛矿太阳能组件的研发、生产。协鑫光电创立初期（厦门惟华时期）主要研究有机光伏（OPV），2013 年研发重心转向钙钛矿光伏；2017 年完成 10MW 65cm×45cm 组件研发线建设，为当时钙钛矿组件的最大尺寸；2019 年完成 A 轮融资，融资金额~2 亿元；2020-2021 年完成 100MW 2m×1m 组件研发线建设，是行业内首款产业化尺寸的钙钛矿组件；2022 年完成 B 轮及 B+轮融资，融资金额~7 亿元，腾讯、红杉、IDG 等入局。

图表45：协鑫光电发展历程

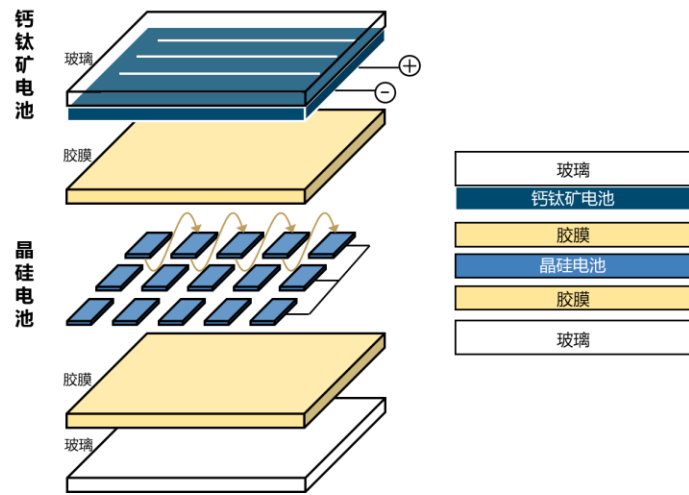


来源：协鑫光电公众号，国金证券研究所绘制

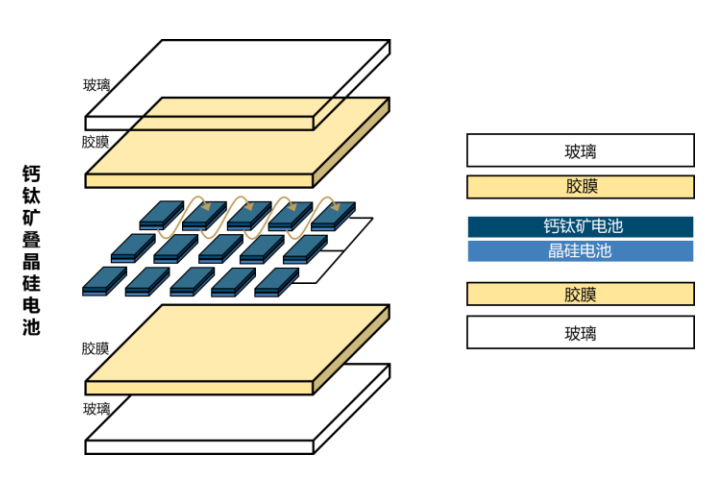
效率方面，根据公司公众号报道，2023 年 11 月，公司 1m×2m 钙钛矿单结组件转换效率达 18.04%；同月，公司 0.3m×0.4m 钙钛矿叠层组件转换效率实现 26.17%；2023 年 12 月，0.4m×0.6m 钙钛矿叠层组件转换效率提高至 26.34%，上述效率均通过中国计量院认证。与市场传统叠层技术不同的是，公司采用组件级叠层方案，根据官方公众号报道，钙钛矿子电池间互相串联，晶硅电池间相互串联，晶硅与钙钛矿间为并联形式。公司认为在未来的大尺寸叠层组件产品中，内部电路的连接方式将与这种小叠层组件保持一致，不同在于钙钛矿顶电池的尺寸将进一步增大，而晶硅底电池的串联数量也会相应增加。



图表46: 组件级叠层方案示意图 (并联结构)



图表47: 电池级叠层方案 (串联)



来源: 第五届全球钙钛矿与叠层电池产业化论坛, 国金证券研究所绘制

来源: 第五届全球钙钛矿与叠层电池产业化论坛, 国金证券研究所绘制

依靠自身技术优势, 稳扎稳打扩大产能规模。产能方面, 协鑫光电现有产能 110MW, 包括上述 10MW 和 100MW 中试线; 2023 年 12 月, 公司在昆山举行全球首个 GW 级大规格 (2.4m×1.2m) 钙钛矿生产基地奠基仪式, 标志着公司钙钛矿组件正式进入 GW 级商业运营新时代, 该项目总投资 50 亿元, 计划建设 2GW 钙钛矿生产线, 分两期建成, 根据公司在第五届全球钙钛矿与叠层电池产业化论坛上所作的报告, GW 级产线效率预计在 2024 年实现 20%, 2025 年提高至 22% 并逐步释放 GW 级产能。市场方面, 公司逐渐走出昆山, 2024 年 1 月, 协鑫光电、山东能源、中科院青能所签订框架协议, 基于协鑫光电的钙钛矿领先技术、山东能源的综合实力及优质市场、中科院青能所的国家级研究平台, 三方以各自的优势作为切入点, 力争在钙钛矿步入成熟阶段, 共同迎接市场红利期的到来。

5、风险提示

钙钛矿产业化进展不及预期: 钙钛矿工艺路线未明确定型, 材料稳定性问题仍有较大提升空间, 当前国内仍未有 GW 级产线投产, 若后续研发进度慢于晶硅技术发展, 则会导致钙钛矿产业化进程延后, 进而对相关公司业绩造成影响;

钙钛矿设备降本不及预期: 钙钛矿量产规模还处于百兆瓦级别, 整体设备投资额较高, 若后续钙钛矿产能落地节奏放缓, 则会导致钙钛矿设备的工艺迭代较慢, 进而对钙钛矿设备降本进度及相关公司业绩造成影响;

晶硅电池成本下降过快风险: 钙钛矿作为下一代太阳能电池, 因其材料成本低廉、增效潜力巨大引起广泛关注, 若晶硅电池成本下降过快, 则会导致钙钛矿产业化停滞或放缓, 进而对相关公司业绩造成影响。



行业投资评级的说明：

- 买入：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 15%以上；
- 增持：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 5%—15%；
- 中性：预期未来 3—6 个月内该行业变动幅度相对大盘在 -5%—5%；
- 减持：预期未来 3—6 个月内该行业下跌幅度超过大盘在 5%以上。



特别声明：

国金证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

形式的复制、转发、转载、引用、修改、仿制、刊发，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。经过书面授权的引用、刊发，需注明出处为“国金证券股份有限公司”，且不得对本报告进行任何有悖原意的删节和修改。

本报告的产生基于国金证券及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，但国金证券及其研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。本报告反映撰写研究人员的不同设想、见解及分析方法，故本报告所载观点可能与其他类似研究报告的观点及市场实际情况不一致，国金证券不对使用本报告所包含的材料产生的任何直接或间接损失或与此有关的其他任何损失承担任何责任。且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，在不作事先通知的情况下，可能会随时调整，亦可因使用不同假设和标准、采用不同观点和分析方法而与国金证券其它业务部门、单位或附属机构在制作类似的其他材料时所给出的意见不同或者相反。

本报告仅为参考之用，在任何地区均不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告提及的任何证券或金融工具均可能含有重大的风险，可能不易变卖以及不适合所有投资者。本报告所提及的证券或金融工具的价格、价值及收益可能会受汇率影响而波动。过往的业绩并不能代表未来的表现。

客户应当考虑到国金证券存在可能影响本报告客观性的利益冲突，而不应视本报告为作出投资决策的唯一因素。证券研究报告是用于服务具备专业知识的投资者和投资顾问的专业产品，使用时必须经专业人士进行解读。国金证券建议获取报告人员应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。报告本身、报告中的信息或所表达意见也不构成投资、法律、会计或税务的最终操作建议，国金证券不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。

在法律允许的情况下，国金证券的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供多种金融服务。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布该研究报告的人员。国金证券并不因收件人收到本报告而视其为国金证券的客户。本报告对于收件人而言属高度机密，只有符合条件的收件人才能使用。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告仅供国金证券股份有限公司客户中风险评级高于C3级(含C3级)的投资者使用；本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的建议或策略。对于本报告中提及的任何证券或金融工具，本报告的收件人须保持自身的独立判断。使用国金证券研究报告进行投资，遭受任何损失，国金证券不承担相关法律责任。

若国金证券以外的任何机构或个人发送本报告，则由该机构或个人为此发送行为承担全部责任。本报告不构成国金证券向发送本报告机构或个人的收件人提供投资建议，国金证券不为此承担任何责任。

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

上海	北京	深圳
电话：021-80234211	电话：010-85950438	电话：0755-83831378
邮箱：researchsh@gjzq.com.cn	邮箱：researchbj@gjzq.com.cn	传真：0755-83830558
邮编：201204	邮编：100005	邮箱：researchsz@gjzq.com.cn
地址：上海浦东新区芳甸路 1088 号 紫竹国际大厦 5 楼	地址：北京市东城区建国内大街 26 号 新闻大厦 8 层南侧	邮编：518000 地址：深圳市福田区金田路 2028 号皇岗商务中心 18 楼 1806



【小程序】
国金证券研究服务



【公众号】
国金证券研究