

光伏新技术前瞻之钙钛矿太阳能电池：崛起的第三代太阳能电池，产业化进程再提速

——钙钛矿太阳能电池行业深度

核心观点

钙钛矿电池为第三代新型太阳能电池，效率提升速度快且潜力大。钙钛矿材料指 ABX₃ 有机-无机金属卤化物，A 为有机阳离子、B 为二价金属阳离子、X 是卤素离子，目前较常见的钙钛矿太阳能电池原材料为碘铅甲胺。从效率提升进程来看，钙钛矿太阳能电池诞生十余年，单结效率从 3.8% 跃升至 25.7%；单结/叠层理论极限效率分别高达 33%/45%，仍有较大提升空间。从结构来看，钙钛矿电池分为介孔型和平面型，正式和反式，目前较主流的为平面反式结构，具有制备工艺简单、可低温制备、成本低等优点，但具有效率不高的缺点。

钙钛矿电池具有降本增效和应用场景广泛等优势，仍面临稳定性差和大面积制备效率下降的挑战。优势包括：1) 低成本，钙钛矿原材料成本低且用量和纯度要求小，生产过程能耗低，大规模量产后钙钛矿组件总成本约为 0.5-0.6 元/瓦，是晶硅组件极限成本的 50%；2) 高效率，钙钛矿材料带隙更接近最优带隙，且带隙可调，适合做效率潜力更高的叠层电池；3) 应用场景广泛，柔性和轻质特点使其适用于 BIPV 和汽车光伏，带隙可调性使其适用于室内光伏。挑战包括：1) 稳定性差导致寿命短，材料本身具有不稳定性且与各功能层易相互影响；2) 大面积制备效率下降，制备工艺的局限性导致大面积制备钙钛矿薄膜均匀性变差，缺陷增多，且尺寸增大时电池非光活性死区面积增大，有效光照面积减小。

钙钛矿组件生产效率高，各功能层制备材料、技术、设备均未定型。钙钛矿组件从原料进去到成品出来仅需约 45 分钟，且可在单一工厂完成，生产效率高。从材料端来看，功能层材料选择未定型，空穴/电子传输层材料分有机和无机体系。钙钛矿组件对水汽阻隔要求高，催生丁基胶和 POE 胶膜需求。从技术端来看，传输层制备路线包括 PVD、RPD、ALD，钙钛矿层制备分为干法和湿法，目前较主流的产业化选择是狭缝涂布法（湿法），具有原料利用率高、可重复性好、成本较低等优点。从设备端来看，核心设备包括镀膜设备、涂布/蒸镀设备、激光设备和封装设备，镀膜设备价值量占比最高，激光设备最具确定性。

钙钛矿电池产业化进程再提速，头部厂家已落地百兆瓦级产线。钙钛矿电池产业处于 0-1 发展阶段，基于钙钛矿材料本身具备高效率低成本的优势，叠加各研发团队在技术上不断进步，包括效率、稳定性等方面突破，使其逐渐走出实验室。在技术突破主导下，政策+资本（一级市场资金关注度高，头部厂家完成多轮融资且有知名投资者入局）加持下，产业化进程不断提速，目前头部厂商如协鑫光电、纤纳光电、极电光能等已落地百兆瓦产线，纤纳光电已完成首批钙钛矿组件出货，且各厂商研发和量产效率正在持续爬坡中，预计明后年内 GW 级产线有望落地。

投资建议

产业仍处于 0-1 阶段，我们认为在发展初期，基于率先释放业绩角度的考虑，建议抓住核心设备（德龙激光、大族激光、迈为股份、帝尔激光、杰普特、捷佳伟创、京山轻机、奥来德等）和核心辅材（金晶科技、耀皮玻璃、隆华科技、阿石创、福斯特、海优新材、赛伍技术、明冠新材、康达新材等）两条投资主线，后期建议关注电池组件企业。

风险提示

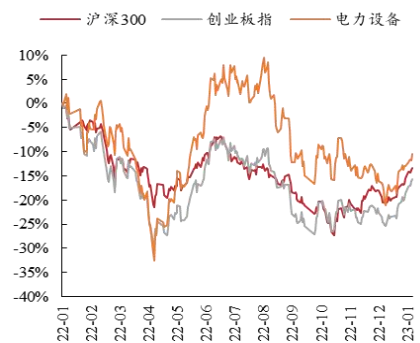
产业化进程不及预期；下游需求不及预期；资本投入不及预期。

评级 推荐（维持）

报告作者

作者姓名	段小虎
资格证书	S1710521080001
电子邮箱	duanxh@easec.com.cn
联系人	柴梦婷
电子邮箱	chaimt@easec.com.cn

股价走势



相关研究

《【电新】2022 年国内光伏新增装机量达 87.41GW，储能锂电池出货量达到 130GWh_20230130》2023.01.30
 《【电新】光伏产业链中下游环节价格降幅放缓，工商业储能迎用户入市机遇_20230116》2023.01.16
 《【电新】国家能源局强调新型电力系统储能建设，光伏装机项目经济性持续提升_20230109》2023.01.09
 《【电新】光伏电池片价格跌幅加剧，特斯拉 4680 电池产业化进程加快_20230103》2023.01.03
 《【电新】硅片环节价格战开启竞争加剧，多省市峰谷电价差拉大利好储能产业_20221226》2022.12.26

正文目录

1. 引言	4
2. 简介：第三代新型太阳能电池，转换效率飞速提升	4
2.1. 定义及原理：钙钛矿指具有 ABX ₃ 型化学组成的化合物，发电原理基于光生伏特效应	4
2.2. 发展历程：诞生十余年，单结转换效率从 3.8% 跃升至 25.7%	6
2.3. 分类及结构：第三代新型太阳能电池，反式平面型为较常见结构	8
3. 优点及产业化痛点：降本增效为最主要优势，仍存在稳定性差和大面积效率下降的挑战	10
3.1. 优点：成本低+转换效率高+应用场景广泛	10
3.2. 产业化痛点：稳定性差导致寿命短、大面积制备效率低	13
4. 生产流程、材料、技术和设备：生产效率较晶硅电池大幅提升，材料、技术和设备均未定型	15
4.1. 生产流程：制作过程仅需 45 分钟，可在单一工厂完成	15
4.2. 材料端：电子和空穴传输层分为有机和无机材料体系，催生丁基胶和 POE 需求	16
4.2.1. 功能层材料：电池材料选择未定型，分为有机和无机材料体系	16
4.2.2. 辅材：钙钛矿组件对水汽隔离要求高，催生丁基胶和 POE 胶膜需求	18
4.3. 设备端：不同技术路线催生不同的设备需求，镀膜设备价值量占比最高	20
4.3.1. 涂布设备：钙钛矿层产业化制备以湿法中的狭缝涂布法为主，催生涂布设备需求	21
4.3.2. 镀膜设备：PVD 为最成熟的选择，镀膜设备价值量占比最高	24
4.3.3. 激光设备：钙钛矿对激光精度要求高，激光设备最具确定性	26
4.3.4. 封装设备：阻隔性能要求高，对标 OLEDs 封装	27
5. 产业化进程：技术进步主导，政策+资本加持，产业化进程再提速	28
5.1. 政策：钙钛矿太阳能电池获国家认可，政策陆续出台助力产业发展	28
5.2. 资本：一级市场资金关注度高，头部厂商完成多轮融资	30
5.3. 厂商进展：百兆瓦产线落地，GW 级产线有望在未来两年内落地	32
5.3.1. 协鑫光电：全球首条大尺寸 100MW 量产线建设者，组件量产效率已达 16%	34
5.3.2. 纤纳光电：率先实现钙钛矿组件出货，多次刷新钙钛矿小组件效率记录	34
5.3.3. 极电光能：全球规模最大的钙钛矿光伏组件生产线建设者，GW 级产线有望 2024 年投产	35
5.3.4. 仁烁光能：全球首条全钙钛矿叠层光伏组件研发线建设者，预计今年 150MW 产线投产	36
6. 投资建议	37
7. 风险提示	38

图表目录

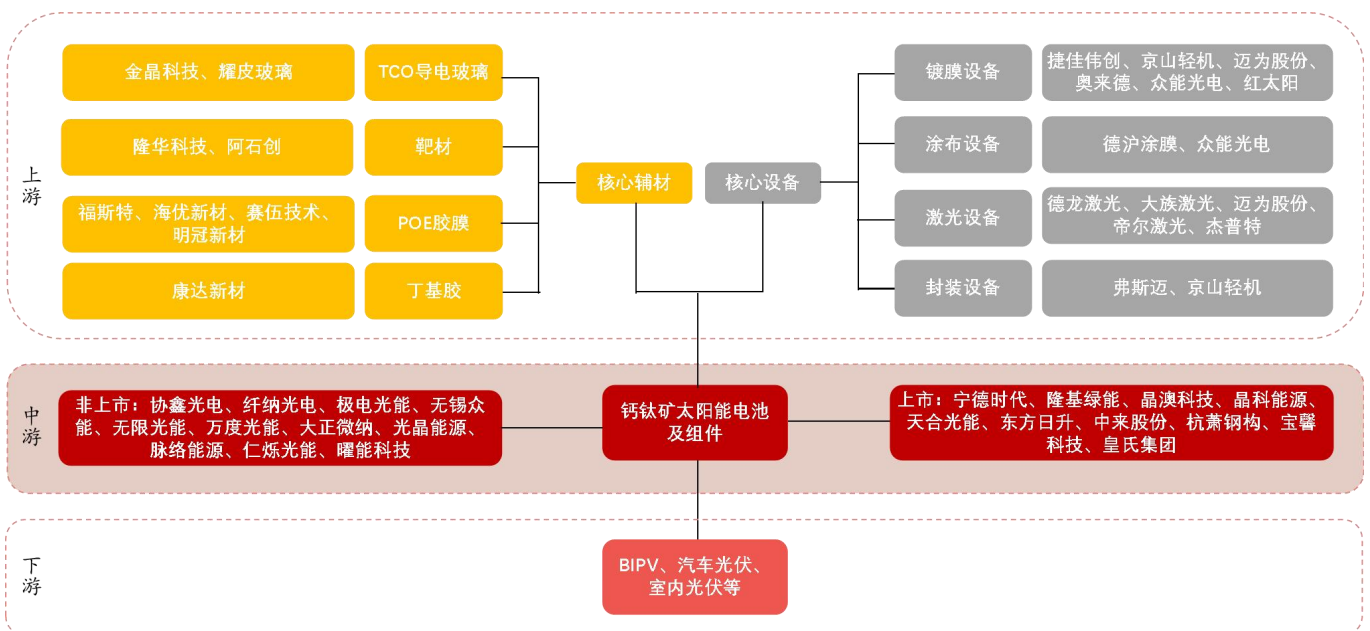
图表 1. 钙钛矿太阳能电池产业链图谱	4
图表 2. 有机-无机杂化的钙钛矿材料晶体结构	5
图表 3. 钙钛矿太阳能电池发电原理（以反式结构为例）	6
图表 4. 钙钛矿电池历史发展进程	7
图表 5. 钙钛矿/晶硅叠层电池转换效率进展	8
图表 6. 太阳能电池类型	9
图表 7. 钙钛矿电池类型	10
图表 8. 钙钛矿电池组件成本构成	11
图表 9. 不同电池开路电压与带宽的对比	12
图表 10. 钙钛矿型化合物带隙对比	12
图表 11. 钙钛矿太阳能电池适用环境	13
图表 12. 影响钙钛矿太阳能电池稳定性的因素	14
图表 13. 不同类型太阳能电池光电转换效率和器件面积关系	15
图表 14. 钙钛矿电池生产流程	16

图表 15. ITO、FTO、AZO 技术参数对比	17
图表 16. 空穴传输层和电子传输层材料选择概览	18
图表 17. POE 与 EVA 对比	19
图表 18. 丁基胶于其他密封胶水汽透过率对比（样品厚度 1mm）	19
图表 19. 溅射靶材工作原理	20
图表 20. 钙钛矿太阳能电池生产流程及相关设备	21
图表 21. 不同方法制备钙钛矿层示意图（湿法）	22
图表 22. 狭缝涂布法和刮刀涂布法参数对比	22
图表 23. 干湿法制备钙钛矿层技术对比	23
图表 24. 气相辅助溶液法示意图	23
图表 25. 涂布/蒸镀设备相关企业及布局进展	24
图表 26. PVD、ALD 技术比较	25
图表 27. 镀膜设备相关企业及布局进展	26
图表 28. 激光在各环节应用	26
图表 29. 激光设备相关企业及布局进展	27
图表 30. 钙钛矿组件封装方式	28
图表 31. 封装设备相关企业及布局进展	28
图表 32. 钙钛矿太阳能电池领域相关政策/会议及内容	30
图表 33. 钙钛矿太阳能电池企业融资进展	31
图表 34. 钙钛矿电池企业梳理（不完全统计）	33
图表 35. 协鑫光电发展进程及产能规划	34
图表 36. 纤纳光电发展进程及产能规划	35
图表 37. 极电光能发展进程及产能规划	36
图表 38. 仁烁光能发展进程及产能规划	37
图表 39. 核心标的估值表（Wind 一致预期）	38

1. 引言

光伏发电已进入了平价时代，下一步即是向光储平价时代迈进，在这个过程中，行业降本增效的诉求更为强烈。实现降本增效的主要路径即是在制造端不断进行技术迭代，我们认为把握新技术发展为光伏行业主要推荐投资主线之一。目前太阳能电池技术正在从传统 P 型 PERC 电池向 TOPCon、HJT、xBC 等 N 型技术过渡。更远期来看，从效率来看，晶硅电池理论极限转换效率为 29.43%，单结/叠层钙钛矿电池理论转换效率将达到 33%/45%，钙钛矿电池具有更大的效率提升潜力；从成本来看，在原材料成本低、能耗低、生产效率高助力下，大规模量产后的钙钛矿组件生产成本仅为晶硅组件极限成本的 50%。钙钛矿电池的发展有望推动行业进一步降本增效，向光储平价时代迈进。钙钛矿电池产业目前仍处于从 0 到 1 的阶段，但产业化进程正在不断提速：今年多家企业百兆瓦产线落地投产，预计 GW 级设备招标有望在年内启动，GW 级产线有望在明后年落地。从投资角度来看，我们认为钙钛矿主题有望受到持续关注，相关设备及核心辅材将率先迎来投资机遇。

图表 1. 钙钛矿太阳能电池产业链图谱



资料来源：各公司公告，东亚前海证券研究所

2. 简介：第三代新型太阳能电池，转换效率飞速提升

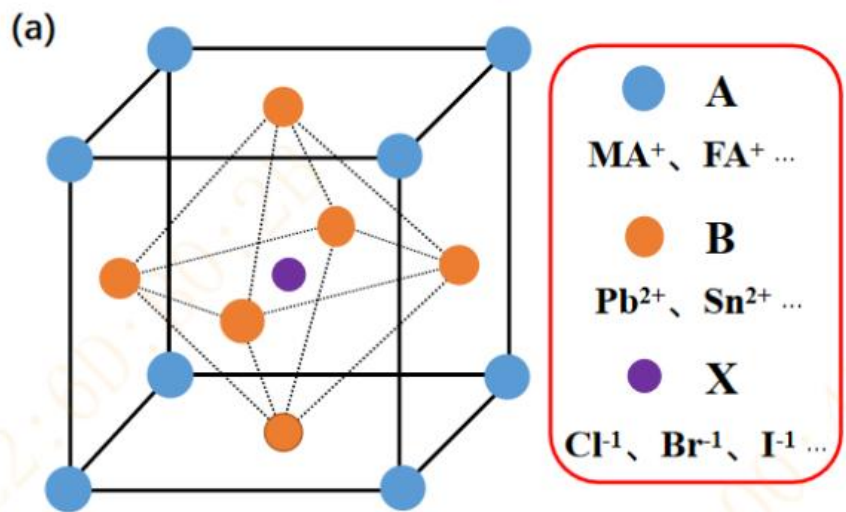
2.1. 定义及原理：钙钛矿指具有 ABX₃ 型化学组成的化合物，发电原理基于光生伏特效应

钙钛矿诞生于 1839 年，广义钙钛矿指具有 ABX₃ 型化学组成的化合物。1839 年，钙钛矿 (Perovskite) 被俄罗斯科学家发现并以其名字来命名。1978 年，Weber 将甲铵离子引入晶体中，便形成了具有三维结构的有机-无机杂

化钙钛矿材料（为钙钛矿太阳能电池的重要原材料）。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。广义的钙钛矿是指具有 ABX_3 型的化学组成的化合物，其中 A (A= Pb^{2+} , Na^+ , Sn^{2+} , Sr^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} 等) 是大半径的阳离子, B (B= Ti^{4+} , Mn^{4+} , Zr^{4+} , Fe^{3+} , Ta^{5+} 等) 是小半径的阳离子, X (X= F^- , Cl^- , Br^- , I^- , O^{2-} 等) 为阴离子。

ABX₃ 有机-无机杂化钙钛矿材料更适用于光伏领域, 其具有三维结构。在众多钙钛矿材料类型里, 具有高介电常数的 $BaTiO_3$ 或一些金属氧化物钙钛矿 (如 $PbTiO_3$ 、 $SrTiO_3$ 、 $BiFeO_3$ 等) 吸光能力较差, 在收集自由电荷方面效率较低, 不适用于光伏领域。相比之下, Weber 首次发现的具有三维结构的有机-无机杂化钙钛矿材料具有合成方法简单、光电性能优异等优势, 更适用于光伏领域。从钙钛矿材料具体形态结构来看, 典型的 ABX_3 有机-无机钙钛矿材料中, A 位为有机阳离子, 如甲铵离子, 甲脒离子, 占据了正方体的八个定点; B 位为二价金属阳离子, 如 Pb^{2+} 、 Sn^{2+} 等, 处于正方体的体心; X 是卤素离子, 如 Br^- 、 I^- 和 Cl^- , 占据了面心。目前较为常见的钙钛矿太阳能电池原材料为碘铅甲胺 ($MAPbI_3$)。

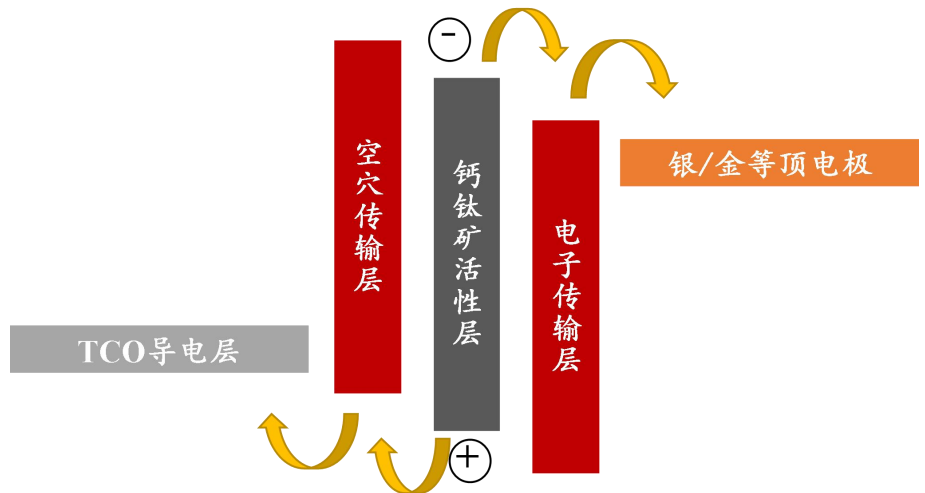
图表 2. 有机-无机杂化的钙钛矿材料晶体结构



资料来源: 《低成本制备高效率钙钛矿太阳能电池的研究》, 东亚前海证券研究所

钙钛矿太阳能电池发电原理基于光生伏特效应, 利用电子和空穴对产生电流。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, 其工作基于半导体的光生伏特效应, 即在光照条件下钙钛矿材料内部处于发射区、势垒区和基区的价带电子会吸收入射光子的能量而跃迁至导带, 从而产生电子-空穴对。具体来看, 当钙钛矿层受到光照后, 内部激子发生分离产生电子和空穴对, 电子通过电子传输层导出, 空穴通过空穴传输层导出, 当器件外加负载便能够形成完整的回路。

图表 3. 钙钛矿太阳能电池发电原理（以反式结构为例）



资料来源：《低成本制备高效率钙钛矿太阳能电池的研究》，东亚前海证券研究所

2.2. 发展历程：诞生十余年，单结转换效率从 3.8% 跃升至 25.7%

钙钛矿太阳能电池诞生十余年，单结转换效率从 3.8% 跃升至 25.7%。从钙钛矿太阳能电池的发展历程来看，2009 年，日本科学家 Kojima 和 Miyasaka 将钙钛矿这种材料应用到染料敏化太阳能电池中，并实现了 3.8% 的光电转换效率，钙钛矿太阳能电池正式诞生。2012 年，研究小组使用固态 spiro-OMeTAD 作为空穴传输层以替代传统的液体电解质并制备出全固态钙钛矿太阳能电池，转换效率达到 9.7%，同年转换效率首次超过 10%，自此实现了钙钛矿电池的固态化。2013-2015 年，得益于两步沉积法、氧化铝取代二氧化钛、采用阳离子交换等途径，钙钛矿太阳能电池转换效率相继突破 15% 和 20%。随后 5 年内，转换效率平均每年提升 1-1.5pct，2019 年实现了 25% 的突破。目前，单结钙钛矿电池转换效率记录为 25.7%，由韩国 Seok 团队于 2021 年创造。钙钛矿太阳能电池诞生十余年以来，实现了光电转换效率从 3.8% 到 25.7%（不考虑叠层）的快速提升，效率爬坡进展亮眼。从理论极限效率来看，单结钙钛矿太阳能电池最高转换效率有望达到 33%，超过晶硅电池 29.4% 的极限效率。

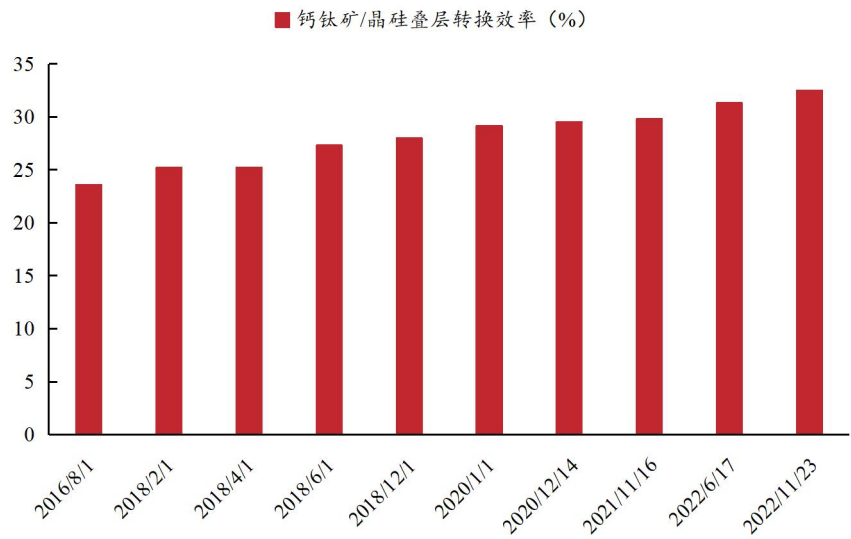
图表 4. 钙钛矿电池历史发展进程

年份	进展
1839	钙钛矿被俄罗斯科学家发现，后以其名字命名（Perovskite）
1978	Weber 将甲铵离子引入晶体中，形成了具有三维结构的有机-无机杂化钙钛矿材料
2009	日本科学家 Kojima 和 Miyasaka 将钙钛矿这种材料应用到染料敏化太阳能电池中，转换效率达到 3.8%
2012	Park 小组使用固态 spiro-OMeTAD 作为空穴传输层以替代传统的液体电解质并制备出全固态钙钛矿太阳能电池，转换效率达到 9.7%；同年转换效率首次突破 10%
2013	染料敏化太阳能电池之父 Michael Grätzel 与其合作者提出在多孔金属氧化物膜内形成钙钛矿染料的两步沉积方法，使用该方法制备的固态介孔钙钛矿太阳能电池实现约 15% 光电转换效率；同年 Henry Snaith 等采用氧化铝取代二氧化钛，取得 15.4% 转换效率
2014	加州大学 Yang Yang 等通过改进钙钛矿光吸收层，选择更适合的电子传输材料，进一步将电池转换效率提升至 19.3%
2015	Sang Il Seok 等通过采用阳离子交换的方法，将电池效率提升至 20.2%
2016	Grätzel 小组将无机铯离子（Cs ⁺ ）添加进甲脒和甲基铵混合的钙钛矿之中，所制备的三阳离子钙钛矿热稳定性更高、相杂质更少、对加工条件的敏感性更低，最终的器件获得了 21.1% 的光电转换效率
2017	Sang Il Seok 等通过引入碘三离子修复钙钛矿缺陷，结合两步法旋涂成膜，将钙钛矿太阳能电池效率记录提升至 22.1%
2018	中国科学院半导体研究所的游经碧小组在 FA-MA 混合钙钛矿薄膜上使用有机卤化盐苯乙基碘化铵（PEAI）进行表面缺陷钝化，将钙钛矿太阳能电池的认证效率提高至 23.3%，随后又制备出 23.7% 的电池器件
2019	美国麻省理工学院和韩国化学技术研究所通过增强电荷载体管理来提高性能，联合创造了 25.2% 的效率记录
2021	韩国蔚山科技大学的 Seok 小组通过使用 Cl-SnO ₂ 以及含氯的钙钛矿前驱体，在 SnO ₂ 电子传输层和卤化物钙钛矿光吸收层之间形成中间层，增强钙钛矿层的电荷提取和传输，并减少界面缺陷，此种方法制备将单结钙钛矿太阳能电池的效率记录改写为 25.7%
2022	6 月，经国际权威机构 JET 第三方认证，南京大学谭海仁及其科研团队研制的全钙钛矿叠层电池稳态光电转换效率高达 28.0%；12 月，经日本 JET 第三方认证，仁烁光能团队研发的全钙钛矿叠层电池稳态光电转换效率达到 29.0%

资料来源：《钙钛矿太阳能电池及其空穴传输研究综述》，《低成本制备高效率钙钛矿太阳能电池的研究》，《高效钙钛矿太阳能电池的制备与性能研究》，《新型钙钛矿太阳能电池研究进展及面临的问题》，东亚前海证券研究所

钙钛矿叠层电池实验室最高转换效率高达 32.5%，理论极限效率为 45%。钙钛矿/钙钛矿、钙钛矿/晶硅、钙钛矿/薄膜等叠层电池为当前研发的热点之一，构建叠层电池能大幅提升光电转换效率。具体来看，钙钛矿电池的光谱响应范围在 300~800 纳米，即可见光波段，而晶硅电池、铜铟镓硒（CIGS）等薄膜电池可以吸收利用红外光。因此，将钙钛矿电池和晶硅、CIGS 等电池组成叠层电池，能够充分利用各波段的光照，获得更高的光电转换效率。从最高转换效率来看，全钙钛矿叠层电池最高转换效率达 29%，由仁烁光能团队于 2022 年研发；钙钛矿/晶硅叠层电池最高转换效率记录为 32.5%，由德国柏林亥姆霍兹中心（HZB）的科学家于 2022 年创造；钙钛矿/薄膜叠层最高转换效率为 24.16%，由美国国家可再生能源实验室于 2020 年研发。从理论极限效率来看，叠层电池的理论转换效率可达 45%。

图表 5. 钙钛矿/晶硅叠层电池转换效率进展

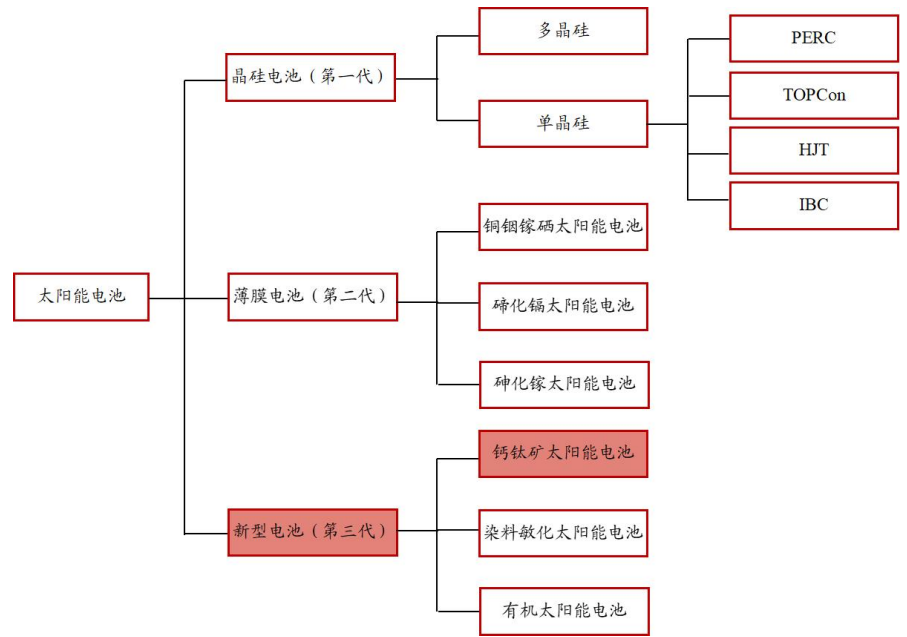


资料来源：NERL，东亚前海证券研究所

2.3. 分类及结构：第三代新型太阳能电池，反式平面型为较常见结构

钙钛矿太阳能电池属于第三代新型电池，未来发展潜力巨大。太阳能电池可以分为以下三类：1) 第一代晶硅电池，包括多晶硅、单晶硅电池，目前技术成熟度和商业化进程均位居各类太阳能电池之首，但该类别电池仍具有难以解决的问题，例如其制备依赖于高纯度的硅料，高纯度硅料价格昂贵，叠加硅基电池制备及封装工艺繁琐；2) 第二代化合物薄膜电池，包括铜铟镓硒太阳能电池（CIGS），碲化镉薄膜太阳能电池（CdTe），砷化镓太阳能电池（GaAs），磷化铟太阳能电池（InP）等。该类电池较晶硅电池具有转换效率高和质量轻等优点，但该类电池的活性层含有部分稀有元素和重金属元素，价格昂贵且难以实现大规模量产；3) 第三代新型电池，包括钙钛矿太阳能电池（PSC），染料敏化太阳能电池（DSSC），有机太阳能电池（OSC），量子点太阳能电池等。该类电池具有原料无毒且储量丰富、成本低、工艺简单且可柔性制备等优点，产业化发展潜力巨大，目前发展仍处于中试线阶段。

图表 6. 太阳能电池类型



资料来源：《低成本制备高效率钙钛矿太阳能电池的研究》，东亚前海证券研究所

钙钛矿太阳能电池根据电荷传输方向不同分为 **n-i-p 型（正式结构）** 和 **p-i-n 型（反式结构）**，根据传输层结构不同分为介孔结构和平面结构。具体来看：

1) **n-i-p 介孔型**，此结构从下到上分别是：透明导电基底，致密的 TiO₂ 电子传输层，TiO₂ 介孔层，钙钛矿层，空穴传输层和金属电极。早期的钙钛矿太阳能电池多采用此结构，但该结构中空穴传输材料会填充在 TiO₂ 介孔层和钙钛矿形成的孔洞中，导致有电子传输能力的 TiO₂ 颗粒与空穴传输层材料接触，最终致使开路电压下降，叠加该类电池需要经过高温烧结，耗能严重且不利于产业化，布局该类企业的企业包括万度光能；

2) **n-i-p 平面型**，又名正式平面结构，此结构从下至上分别是：透明导电基底，n 型电子传输层，钙钛矿层，p 型空穴传输层和金属电极。与介孔结构相比，平面型结构具有制备工艺简单、开路电压更高等优势；

3) **p-i-n 平面型**，又名反式平面结构，此结构从下至上分别是：透明导电基底，p 型空穴传输层，钙钛矿层，n 型电子传输层和金属电极。该类结构制备工艺简单、可低温制备、成本低，可用于钙钛矿叠层器件的制备，且迟滞现象几乎可以忽略，但具有效率不高的缺点，布局该类企业的企业包括协鑫光电、极电光能等。目前反式平面结构为钙钛矿电池产业化进程中较为主流的选择。

图表 7. 钙钛矿电池类型



资料来源：《钙钛矿太阳能电池及其空穴传输研究综述》，东亚前海证券研究所

3. 优点及产业化痛点：降本增效为最主要优势，仍存在稳定性差和大面积效率下降的挑战

3.1. 优点：成本低+转换效率高+应用场景广泛

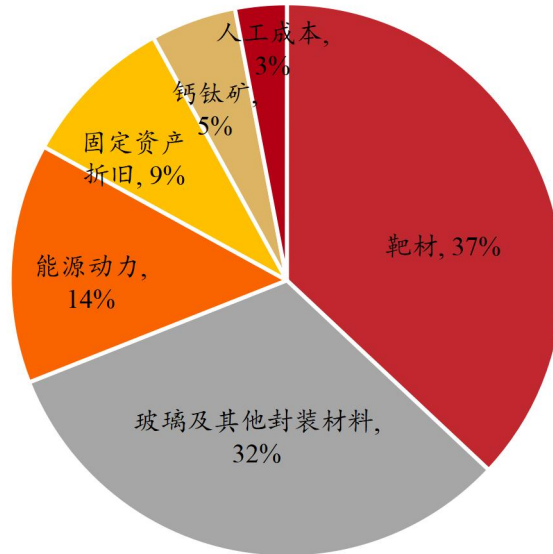
钙钛矿太阳能电池具有成本低的优势，钙钛矿组件成本是晶硅组件极限成本的 50%。钙钛矿太阳能电池具有成本低的显著优势，其低成本主要表现在：

1) 原材料成本较低，a) 钙钛矿层原材料均为基础化工材料，储量较丰富且价格较低；b) 原材料用量少，钙钛矿层厚度仅有 500nm 左右，单晶硅电池硅片平均厚度在 150 微米；c) 钙钛矿材料对于提纯要求不高，对比硅基太阳能电池必须使用 99.9999% 高纯硅，太阳能级钙钛矿材料纯度要求 95% 以上即可；

2) 制备过程可低温进行，能耗较低，钙钛矿电池可以采用溶液法制备，生产工艺流程温度不超过 150°C，而晶硅材料的铸锭和拉晶都需要 1500°C 以上高温，生产能耗差距较大，每瓦单晶组件制造的能耗约是 1.52KWh，而每瓦钙钛矿组件能耗约为 0.12KWh，单瓦能耗只有晶硅的 1/10；

3) 生产效率高，钙钛矿电池从原材料到最后的组件制备，整个生产流程仅需要约 45 分钟，生产效率大幅提升。从钙钛矿组件成本构成来看，钙钛矿占比约为 5%，玻璃、靶材等占到另外的 2/3，总成本约为 0.5-0.6 元/瓦，是晶硅组件极限成本的 50%。

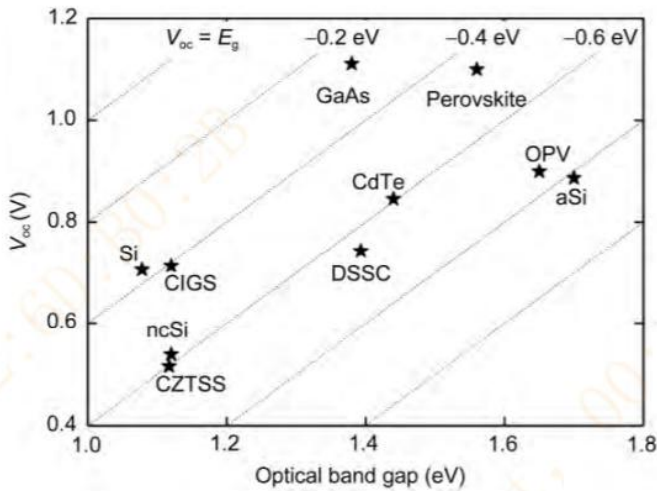
图表 8. 钙钛矿电池组件成本构成



资料来源：能镜公众号，东亚前海证券研究所

钙钛矿太阳能具有高转换效率和发电量的优势，叠层更具效率发展潜力。钙钛矿太阳能电池理论极限效率高达 33%，实验室最高效率为 25.7%；叠层极限效率更是高达 45%，实验室最高效率为 29%。钙钛矿太阳能电池的高转换效率及发电量主要得益于：1) 钙钛矿材料带隙更接近最优带隙，Shockley-Queisser 限制下，单结太阳能电池转换效率的理论值最高为 33.7% (对应带隙 1.34 eV)，传统的铅基钙钛矿材料的禁带宽度在 1.5 ~ 1.7 eV 范围内，传统晶硅电池的带隙约为 1.12eV，钙钛矿的带隙更为接近最优带隙。以 CH₃NH₃PbI₃ 为例，钙钛矿薄膜作为直接带隙半导体，禁带宽度为 1.55 eV，电导率为 10⁻³ S/m³，载流子迁移率为 50 cm²/(V · s)，吸收系数 10⁵，消光系数较高，几百纳米厚薄膜就可以充分吸收 800 nm 以内的太阳光，对蓝光和绿光的吸收明显要强于硅电池，且钙钛矿晶体具有近乎完美的结晶度，极大地减小了载流子复合，增加了载流子扩散长度；2) 带隙可调，适合叠层电池的制备，叠层电池具有更高的转换效率天花板，叠层电池理论极限转换效率高达 45%；3) 钙钛矿的温度系数趋近于 0：晶硅组件的温度系数是 -0.3%/°C 左右，即温度每上升 1 度，功率下降 0.3%；而钙钛矿的温度系数为 -0.001%/°C，趋近于 0，故而其实际发电效率显著高于晶硅。

图表 9. 不同电池开路电压与带宽的对比



资料来源：《钙钛矿太阳能电池：光伏领域的新希望》，东亚前海证券研究所

图表 10. 钙钛矿型化合物带隙对比

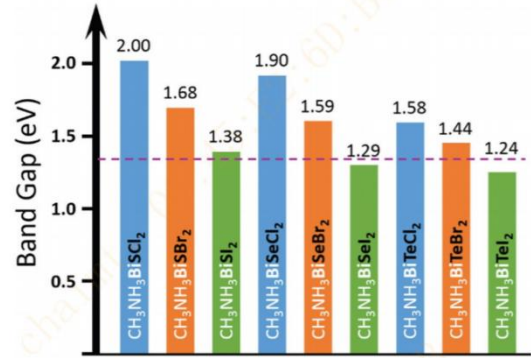


图 1-9 钙钛矿型化合物 CH₃NH₃BXY₂(X=S, Se, Te; Y=Cl, Br, I) 虚线代表最佳带隙(Shockley-Queisser)

资料来源：《钙钛矿太阳能电池：光伏领域的新希望》，东亚前海证券研究所

钙钛矿太阳能电池具有轻质和柔性特点，下游应用场景广泛。钙钛矿太阳能电池下游应用场景广泛主要得益于钙钛矿材料吸光系数大，厚度较薄就能实现对太阳光的有效利用（传统晶硅电池硅片厚度在 150 微米左右，钙钛矿层厚度在 500 纳米左右），钙钛矿材料特性决定了钙钛矿电池的制作可采用轻薄、柔性基底。轻质和柔性特点使钙钛矿太阳能电池适用于更广泛的应用场景，比如 BIPV、汽车光伏等。此外，钙钛矿太阳能电池的带隙可调性使其具有室内光伏电池理想的宽带隙，将钙钛矿电池的下游应用范围拓展至弱光及室内光伏，进而可以广泛应用于工业物联网、智能家居和智能出行等领域。目前已有相关企业布局该应用领域的研究，经国家光伏产业计量测试中心认证，广东脉络能源科技有限公司研发的钙钛矿室内光伏电池光电转换效率在 1000lux U30 光源照射下达到 44.72%，为当前世界最高值。

图表 11. 钙钛矿太阳能电池适用环境

钙钛矿太阳能电池适用场景

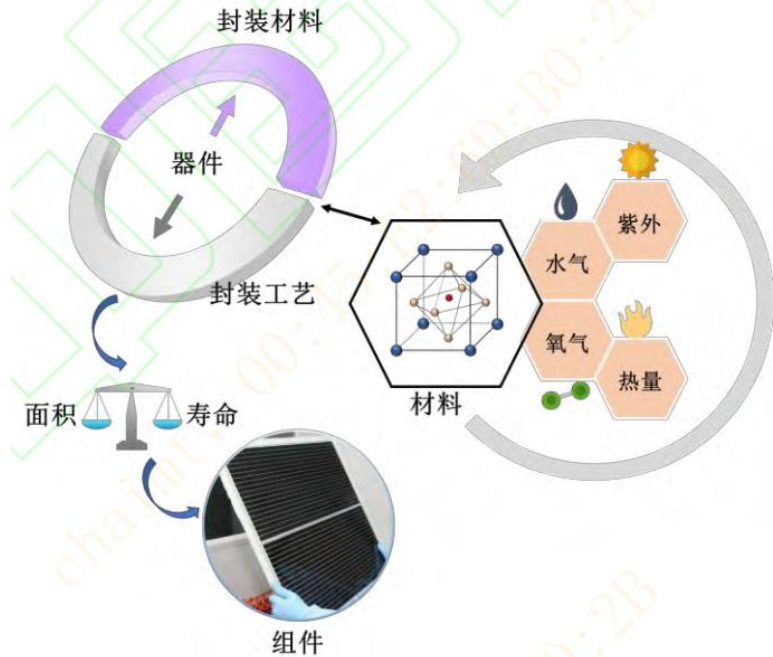


资料来源：新华网，Sunpower，暨南大学新能源技术研究院，东亚前海证券研究所

3.2. 产业化痛点：稳定性差导致寿命短、大面积制备效率低

钙钛矿太阳能电池具有不稳定，主要系钙钛矿材料本身和各功能层相互影响所致。影响钙钛矿太阳能电池稳定性的因素主要包括：1) 钙钛矿材料本身具有不稳定性（决定性因素）。钙钛矿材料易在水、氧气、热、光等环境作用下加快分解；2) 器件中各功能层（空穴传输层、电子传输层、电极）与钙钛矿层易产生相互影响。在正式结构中，多用 TiO₂ 和 ZnO 等金属氧化物做电子传输层，这两种材料在光照下会产生光生空穴并催化分解钙钛矿材料。Spiro-OMeTAD 是空穴传输层的常用材料，其对碘离子比较敏感，钙钛矿材料中的碘离子扩散到 Spiro-OMeTAD 后，会降低其电荷传输性能。金属顶电极为目前较主流的选择，但金属原子可以通过扩散作用进入到钙钛矿层中，引起钙钛矿材料发生分解，且光生伏特效应所形成的内建电场会加剧原子的扩散，从而加速分解。此外，钙钛矿材料中的卤素离子会扩散到金属电极并造成腐蚀，从而影响性能。任何一个环节材料性能失效都会导致产品性能衰减，从而影响电池的稳定性。

图表 12. 影响钙钛矿太阳能电池稳定性的因素

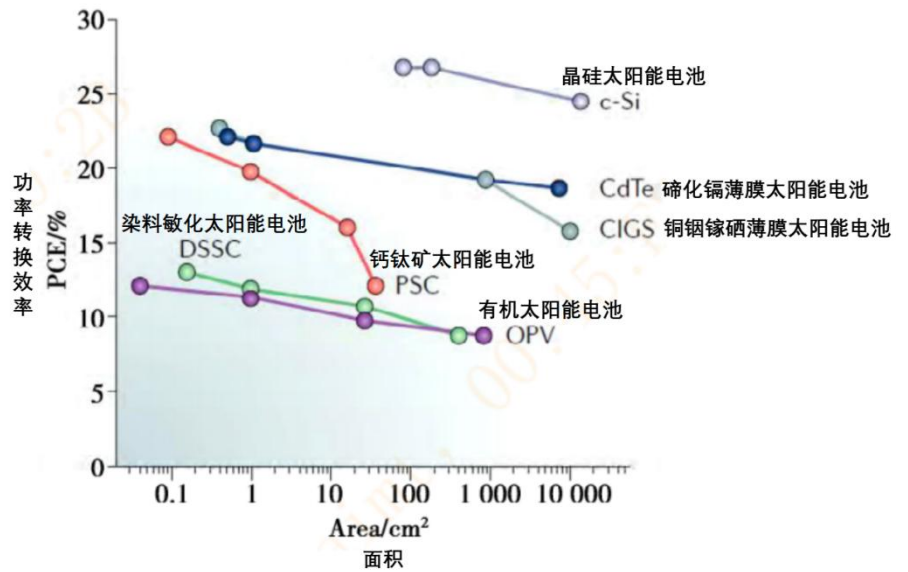


资料来源：《钙钛矿太阳能电池稳定性研究进展及模组产业化趋势》，东亚前海证券研究所

钙钛矿太阳能电池稳定性差致使其寿命较短，成为制约产业化的重要因素之一。根据《太阳能钙钛矿电池技术发展和经济性分析》中指出，目前钙钛矿电池持续光照实验最长达到 10000h，若按照全天平平均日照时长 4h 计算，理论寿命也只有 6.8 年。若再考虑到每天实际日照时间会多于 4h，以及其他日常损耗，正常寿命将会小于 6.8 年，与目前晶硅电池的理论寿命 25 年相比，仍然有很大差距。虽然纤纳光电的 α 组件已顺利通过 IEC61215、IEC61730 稳定性全体系认证（经德国电气工程师协会 VDE 权威认证），行业内仍缺少更多数据的佐证，终端客户对寿命的顾虑未完全消除。

钙钛矿太阳能电池大面积制备效率低，存在效率与面积不可兼得的问题。目前实现较高转换效率的钙钛矿电池均是较小的实验室尺寸（小于 1 平方厘米），单结钙钛矿太阳能电池转换效率记录 25.7% 实现于 0.1 平方厘米的尺寸，商业化尺寸电池目前平均转换效率在 16% 左右。电池面积增加时必然会导致转换效率下降，晶硅、碲化镉薄膜、染料敏化太阳能电池和有机太阳能电池的器件面积每增加一个数量级，其转换效率大约下降 0.8%，而钙钛矿太阳能电池转换效率下降幅度更大，主要原因系：1) 制备大面积钙钛矿薄膜时，由制备工艺的局限性导致钙钛矿薄膜均匀性变差，孔洞增加，缺陷增多。实验室制备钙钛矿薄膜主要采用溶液旋涂法，该方法中反溶剂的使用量是影响钙钛矿层质量的关键因素之一，且本身具有边缘效应，会导致钙钛矿薄膜的厚度不均匀；2) 尺寸增大时电池的非光活性死区（栅线区、刻蚀区）面积增大，使得有效光照面积减小，进而导致组件短路电流密度减小；3) 与串并联结构设计和组件工艺相关，导致组件串联电阻增大，转换效率降低。

图表 13. 不同类型太阳能电池光电转换效率和器件面积关系



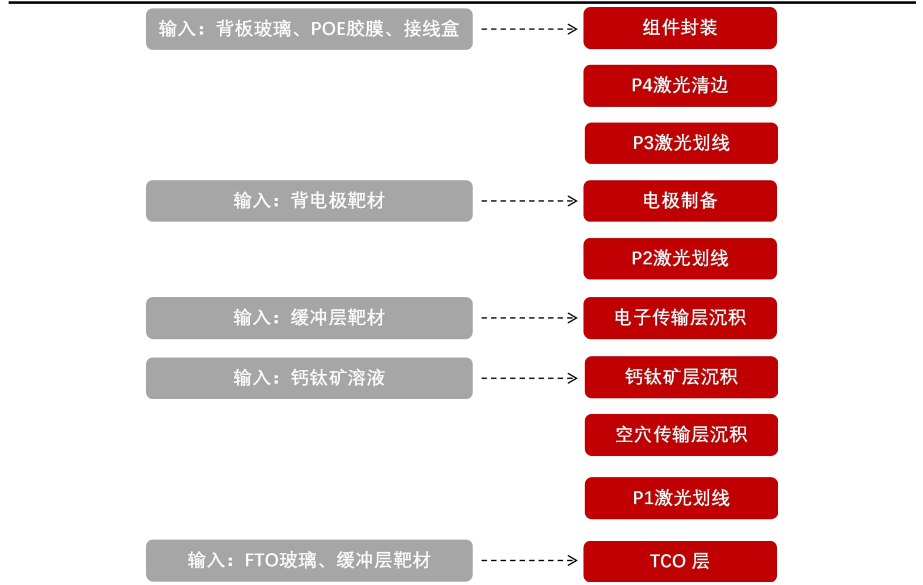
资料来源：《大面积钙钛矿薄膜制备技术的研究进展》，东亚前海证券研究所

4. 生产流程、材料、技术和设备：生产效率较晶硅电池大幅提升，材料、技术和设备均未定型

4.1. 生产流程：制作过程仅需 45 分钟，可在单一工厂完成

钙钛矿太阳能电池生产效率较高，完整的生产流程仅需 45 分钟。以反式结构为例，单结钙钛矿太阳能电池生产流程大致可以概括为以下环节：TCO 层制备——P1 激光划线——空穴传输层沉积——钙钛矿层沉积——电子传输层沉积——P2 激光划线——电极制作——P3 激光划线——P4 激光清边——组件封装与测试。值得注意的是，钙钛矿太阳能电池具有更高的生产效率，从玻璃、靶材、化工材料、胶膜等原材料的进入到组件成型，整个生产流程仅需 45 分钟左右，相较于传统晶硅组件制作时间（大约 3 天）大幅缩短，且钙钛矿太阳能组件的制备可以在单一工厂完成，晶硅组件则需要流转四个工厂（硅料厂、硅片厂、电池片厂、组件厂）。

图表 14. 钙钛矿电池生产流程



资料来源：协鑫光电，东亚前海证券研究所

4.2. 材料端：电子和空穴传输层分为有机和无机材料体系，催生丁基胶和 POE 需求

4.2.1. 功能层材料：电池材料选择未定型，分为有机和无机材料体系

电池材料选择未定型，电子和空穴传输层分为有机和无机材料体系。钙钛矿太阳能电池产业还处于 0-1 阶段，其技术路线和材料选择均未定型，从各功能层材料选择层面来看：

TCO 层（透明导电基底）：TCO 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，它位于器件最底端，是太阳光和载流子传输的重要部件，需要具备高透光率和高导电率的特征。常见的透明导电玻璃材料包括铟锡氧化物（ITO）、氟锡氧化物（FTO）和铝掺杂的氧化锌（AZO）。ITO 薄膜应用最早，具有导电性好、膜层牢固等优点，但原材料铟为稀有元素故而价格较高。FTO 薄膜导电率略逊于 ITO 薄膜，但成本相对较低，且化学和力学抵抗性好。AZO 薄膜光电性能已与 ITO 薄膜相当，且原材料易得故而成本相对较低，性价比优于 ITO 薄膜，但存在镀膜后不能钢化，且耐候性较差的问题，目前产业化应用尚未成熟。从导电率角度来看，三种材料的排序为：ITO>AZO>FTO；从化学耐久性角度来看，三种材料的排序为：FTO>ITO>AZO；从硬度角度来看，三种材料的排序为：FTO>ITO>AZO。

图表 15. ITO、FTO、AZO 技术参数对比

	优点	缺点
ITO	电导率高；膜层牢固	基板尺寸小；有毒；铟为稀有元素价格高
FTO	膜层硬；化学和力学抵抗性好	方阻大；透过率偏低
AZO	原料易得，制造成本低，无毒，易掺杂，性能指标好	膜层软，镀膜后不能钢化；刻蚀后存放时间短

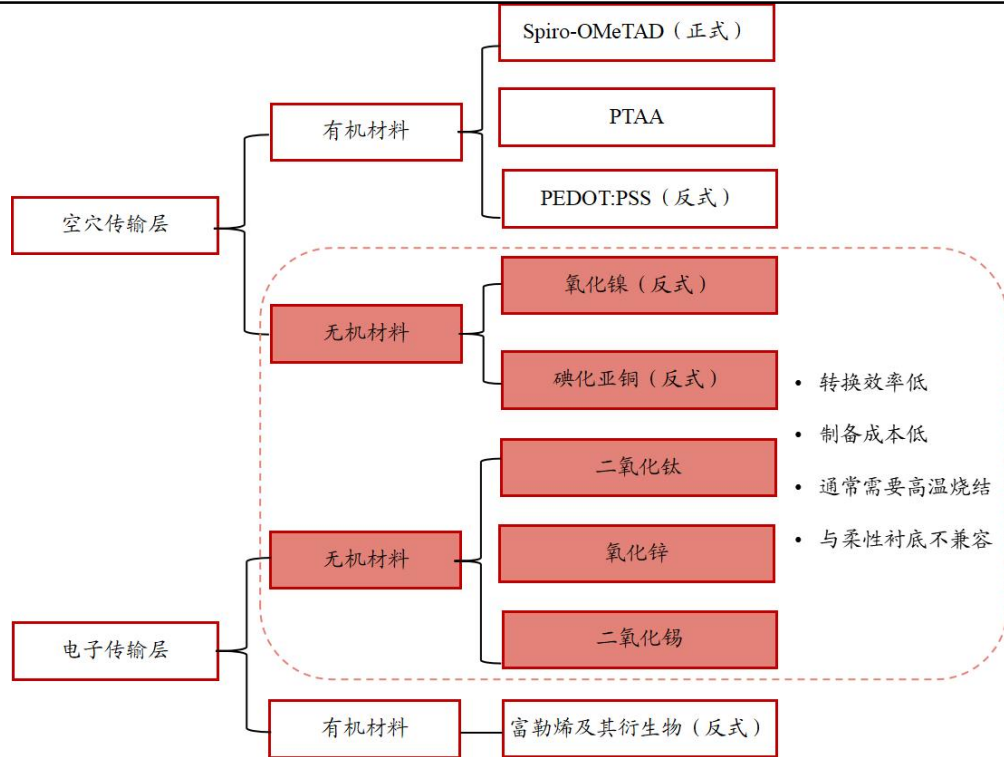
资料来源：《TCO 玻璃的应用及制备方法》，东亚前海证券研究所

空穴传输层：良好的空穴传输材料需要符合以下条件：1) 较高的空穴迁移率；2) 较好的疏水性，可以有效阻挡水汽；3) 能采用溶液法制备，符合实际应用需要；4) 其物理性质必须与钙钛矿匹配，具有与钙钛矿吸光层匹配的能级。空穴传输层材料可以分为有机材料和无机材料，常用的有机材料包括 Spiro-OMeTAD（多用于正式结构）、PTAA、PEDOT:PSS（多用于反式结构）等，常用的无机材料（多用于反式结构）包括氧化镍、碘化亚铜等。无机材料较有机材料具有化学稳定性强、空穴迁移率高、制备成本低、易于合成等优势，但无机材料通常需要高温烧结，且与柔性衬底不兼容。此外，根据目前披露的电池效率来看，采用无机材料制作空穴传输层的电池效率不及采用有机材料制作空穴传输层的电池效率。

钙钛矿层：广义钙钛矿指 ABX₃ 型化合物，在典型的 ABX₃ 有机-无机钙钛矿材料中，A 位为有机阳离子，如甲铵离子，甲脒离子；B 位为二价金属阳离子，如 Pb²⁺、Sn²⁺等；X 是卤素离子，如 Br⁻、I⁻和 Cl⁻。目前较为常见的钙钛矿太阳能电池原材料为碘铅甲胺（MAPbI₃）。

电子传输层：常见的电子传输材料包括二氧化钛(TiO₂)，氧化锌(ZnO)，二氧化锡(SnO₂)等金属氧化物，有机体系包括富勒烯(C₆₀)及其衍生物。其中，二氧化钛为最早诞生，也是目前为止应用最广泛的电子传输层材料，主要得益于其具有能级合适，粒径可控和较长的电子寿命的优势。有机电子传输层在钙钛矿太阳能电池中应用的种类并不多，常见的是 C₆₀ 及其衍生物，应用在反式结构中。采用有机材料（C₆₀ 及其衍生物）制备电子传输层的器件具有稳定性强和转换效率高等优势，但同时具有价格昂贵的劣势。

图表 16. 空穴传输层和电子传输层材料选择概览



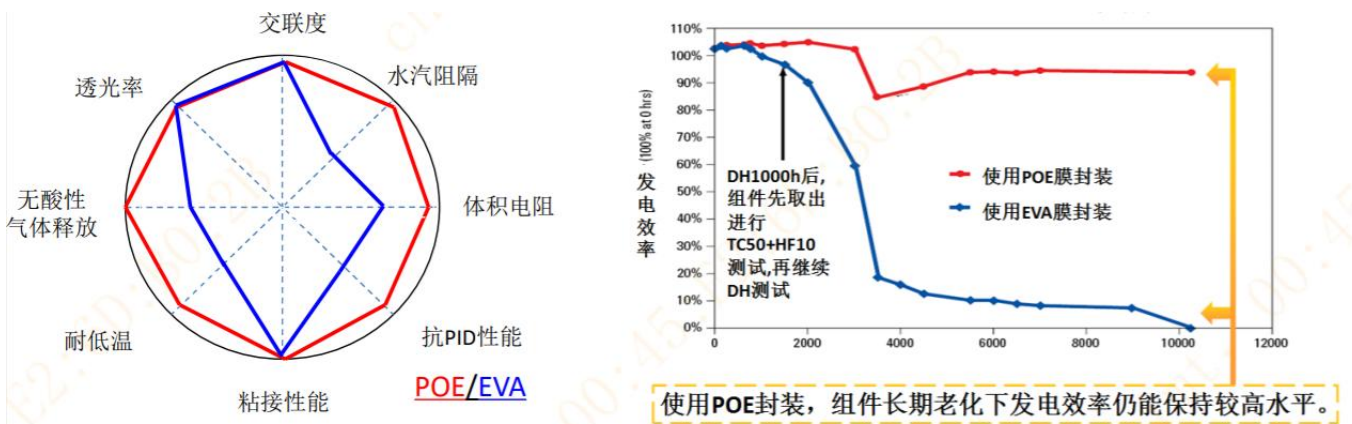
资料来源：《低成本制备高效率钙钛矿太阳能电池的研究》，东亚前海证券研究所

顶电极：顶电极对于钙钛矿太阳能电池中的电荷收集起着至关重要的作用，良好的顶电极材料能够改善器件的光电性能和长期稳定性，其材料选择主要包括金属（Ag、Au 等）和非金属（碳等）。其中，金属顶电极具有更高的光电转换效率，但金属顶电极成本较高、制备需要高温高真空的蒸镀工艺，且光吸收能力和长期稳定性有待提高。碳材料具有来源丰富、成本低、导电性好、化学稳定性好等优势，且碳材料的功函数与金的功函数相似，使得碳材料成为制作顶电极的理想选择之一。使用碳材料制作的顶电极材料成本低、稳定性好，但导电率明显不及金属顶电极。

4.2.2. 辅材：钙钛矿组件对水汽隔离要求高，催生丁基胶和 POE 胶膜需求

POE 胶膜具有较强的水汽阻隔能力和抗老化的优势，在钙钛矿太阳能电池中的渗透率为 100%。POE 胶膜较 EVA 胶膜主要具有以下优势：1) POE 属于非极性材料，故具有优异的水汽阻隔能力，根据福斯特公司公告，POE 胶膜水汽透过率仅是 EVA 胶膜的 1/10；2) POE 分子链结构稳定，老化过程中不会分解产生酸性物质，故具有较强的抗老化能力。根据 CPIA，2022 年，POE 胶膜和 EPE（EVA-POE-EVA）共挤型胶膜在晶硅组件中的市场份额占比达 34.9%，广泛应用于双玻组件和 N 型组件。钙钛矿组件将催生对 POE 胶膜的需求，晶硅电池封装中的主流选择 EVA 胶膜不适用于钙钛矿组件的封装，主要原因系钙钛矿材料遇到水汽等会加速分解，叠加 EVA 降解产生醋酸从而影响到钙钛矿活性层性能。

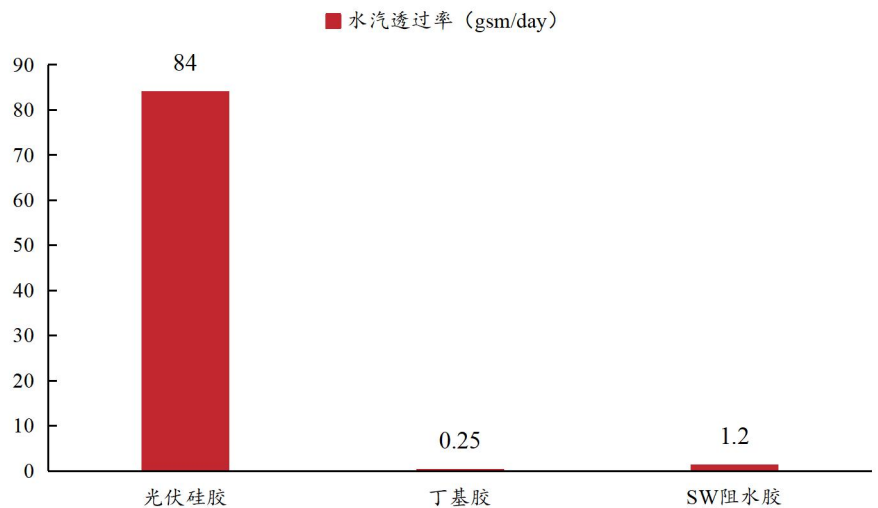
图表 17. POE 与 EVA 对比



资料来源：《POE 胶膜关键指标对双玻组件的影响》，东亚前海证券研究所

丁基胶较硅胶具有更低的水汽透过率，是钙钛矿组件封装的优质选择。目前晶硅组件常用的铝边框和硅胶密封可以有效阻挡液态水，但不能阻挡水汽分子，故不再适用于钙钛矿组件的封装。丁基材料的水汽透过率低，根据赛伍技术在 HJT 创新技术成果大会中披露，光伏硅胶水汽透过率为 84 克每平方米每天，而丁基胶水汽透过率仅为 0.25 克每平方米每天。使用丁基材料替代硅胶形成组件封装可以大大下降水汽透过率以保证组件的发电稳定性，对于钙钛矿组件等对水汽隔离要求较高的组件，采用丁基胶封装是较好的选择。

图表 18. 丁基胶于其他密封胶水汽透过率对比（样品厚度 1mm）

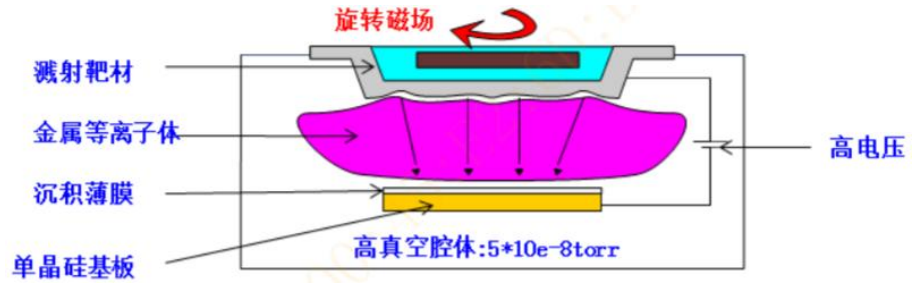


资料来源：HJT 创新技术成果分享会（赛伍技术分享），东亚前海证券研究所

钙钛矿电池 TCO 层激发 ITO 靶材增量需求，靶材占比钙钛矿组件成本高。靶材是镀膜的核心原材料，在溅射工艺中起到的作用是：溅射工艺利用离子源产生的离子，在高真空中经过加速聚集，而形成高速度能的离子束流，轰击固体表面，离子和固体表面原子发生动能交换，使固体表面的原子离开固体并沉积在基底表面，被轰击的固体即是溅射靶材。靶材应

用领域包括超大规模集成电路芯片、液晶面板、薄膜太阳能电池制造的物理气相沉积（PVD）工艺步骤，下游涉及半导体、平板显示器和太阳能电池等行业。靶材在钙钛矿太阳能电池中的应用主要包括TCO层、空穴传输层、电子传输层和顶电极制备环节，TCO层的存在激发了ITO靶材的增量需求。目前靶材行业仍被美、日等企业垄断，应用于钙钛矿电池的靶材供应商主要包括隆化科技和阿石创。从协鑫百兆瓦产线的钙钛矿组件成本组成来看，靶材是最主要的成本构成，成本占比37%。

图表 19. 溅射靶材工作原理



资料来源：江丰电子招股说明书，东亚前海证券研究所

4.3. 设备端：不同技术路线催生不同的设备需求，镀膜设备价值量占比最高

技术路线和设备选择未定型，核心设备包括镀膜、涂布和激光设备。钙钛矿太阳能电池产业还处于0-1阶段，其技术路线和材料选择均未定型，从技术路线选择层面来看，以反式结构为例，空穴传输层制备主要技术路线为PVD（包括磁控溅射和蒸镀）；电子传输层主要技术路线包括PVD磁控溅射、RPD、ALD；电极主要技术路线为PVD（包括磁控溅射和蒸镀）；钙钛矿层可供选择的主流工艺路线包括狭缝涂布和真空蒸镀，目前狭缝涂布为较主流的技术路线。钙钛矿太阳能组件生产过程中的核心设备包括镀膜设备（PVD、RPD、ALD）、涂布设备和激光设备，其他设备包括前道清洗设备、封装设备等。相关环节涉及的设备选择和相关厂商详见下图。

图表 20. 钙钛矿太阳能电池生产流程及相关设备

工艺流程	设备	厂家
组件封装	封装设备	弗斯迈、京山轻机
P4激光清边	激光设备	迈为股份、德龙激光、大族激光、帝尔激光、杰普特
P3激光划线	激光设备	迈为股份、德龙激光、大族激光、帝尔激光、杰普特
电极制备	PVD	京山轻机、捷佳伟创、众能光电、红太阳、德国莱宝
P2激光划线	激光设备	迈为股份、德龙激光、大族激光、帝尔激光、杰普特
电子传输层沉积	PVD/RPD/ALD	捷佳伟创、京山轻机、迈为股份、众能光电、红太阳
钙钛矿层沉积	涂布设备/蒸镀设备	德沪涂膜、日本东丽、众能光电、大正微纳、奥来德
空穴传输层沉积	PVD	京山轻机、捷佳伟创、众能光电、红太阳、德国莱宝
P1激光划线	激光设备	迈为股份、德龙激光、大族激光、帝尔激光、杰普特
TCO层	清洗设备	京山轻机

资料来源：各公司公告，东亚前海证券研究所

4.3.1. 涂布设备：钙钛矿层产业化制备以湿法中的狭缝涂布法为主，催生涂布设备需求

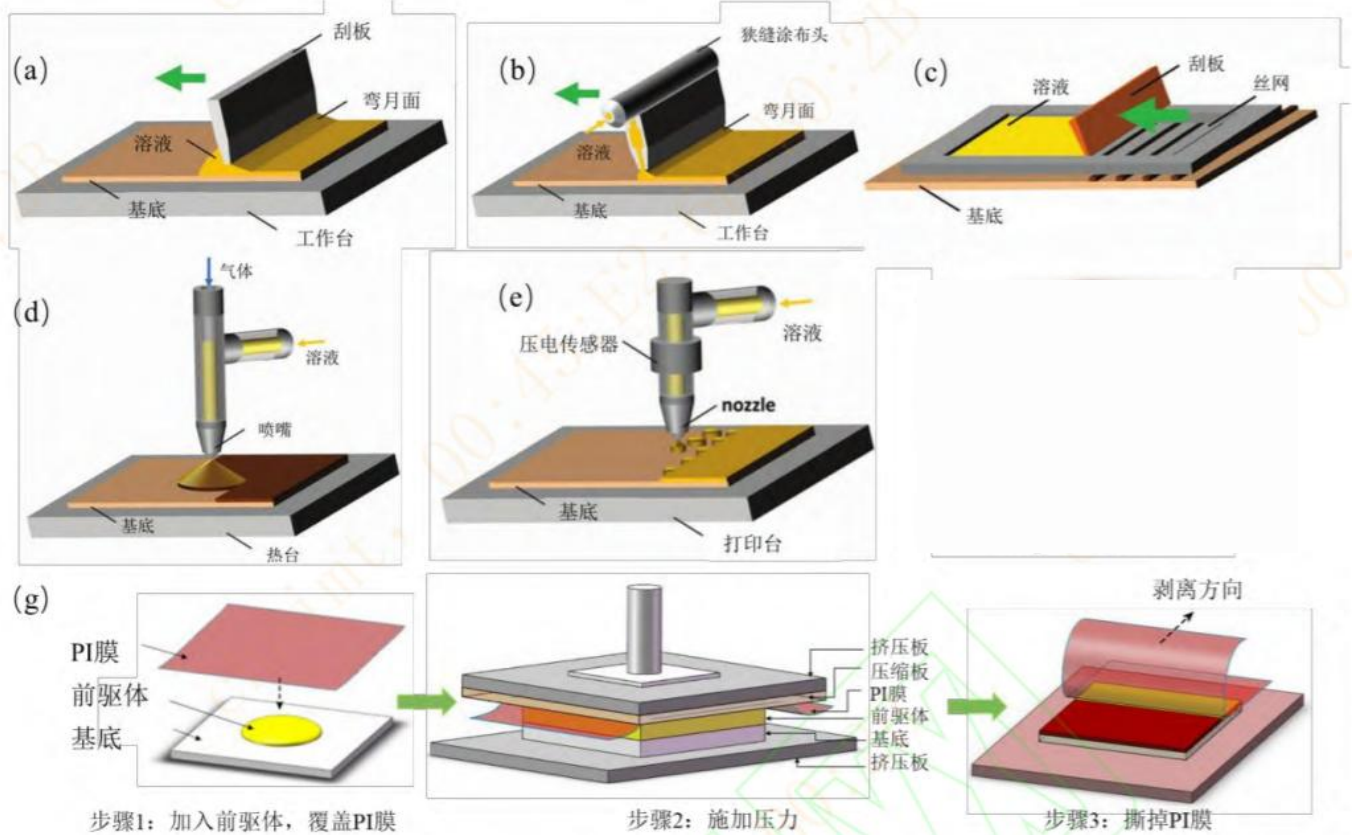
钙钛矿层产业化制备技术主要分为湿法和干法，干湿法混合为新的研究方向。钙钛矿层的制备是生产过程中的核心环节，其成膜质量直接决定了电池的转换效率，目前主要制备方法包括溶液涂布法（湿法）、真空蒸镀法（干法）、气相辅助溶液法（干湿法结合）。其中，溶液涂布法又分为刮刀涂布法、狭缝涂布法、丝网印刷法、喷涂法、喷墨打印法和软膜覆盖法，具体来看：

1) 溶液涂布法制备（湿法）：

- a) 刮刀涂布法：**利用刮刀与基底的相对运动，通过刮板（半月板）将钙钛矿前驱体溶液分散到预制备基底上成膜。相较于早期仅适用于小规模产线的旋涂法，刮刀涂布法具有成膜质量优、工艺稳定性强，叠加钙钛矿溶液的浪费大幅减小等优势；
- b) 狭缝涂布法：**将钙钛矿前驱体墨水存储在储液泵中，并通过控制系统将其按照设定参数均匀地从狭缝涂布头中连续挤压至基底上以形成连续、均匀钙钛矿液膜。狭缝涂布法较刮刀涂布法具有目标钙钛矿液膜的参数可以通过控制系统参数设定进行精确设计、可避免基底平整度不好而导致的涂布头与基底的直接刮擦及密闭环境可以有效隔离人与有机溶剂的接触的优势；
- c) 丝网印刷法：**通过丝网的数目和厚度调整制备薄膜的厚度，对丝网制备要求较高；
- d) 喷涂法：**通过对喷枪内的钙钛矿前驱液施加压力，使溶液从喷嘴喷

出后分散成微小的液滴并均匀沉积到基底上成膜。该方法适用于大面积制备，但原料利用率低且有毒液体可能造成沉积腔室的污染；e) 喷墨打印法：控制打印腔内压力的变化将钙钛矿前驱体墨水从打印头喷出并打印到预沉积基底上成膜。该成膜工艺具有原料利用率高、可大面积制备等优点，但生产效率较低；f) 软膜覆盖法：不依赖于常见溶剂和真空环境，在压力下用聚酰亚胺膜（PI）覆盖的方式将胺络合物前驱体快速转化为钙钛矿薄膜。该方法沉积的钙钛矿薄膜无针孔且高度均匀，器件迟滞较小，且可以在低温空气下进行，便于大面积钙钛矿器件制备，但其材料利用率和生产效率较低。

图表 21. 不同方法制备钙钛矿层示意图（湿法）



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》（a为刮刀涂布法，b为狭缝涂布法，c为丝网印刷法，d为喷涂法，e为喷墨打印法，g为软膜覆盖法），东亚前海证券研究所

图表 22. 狭缝涂布法和刮刀涂布法参数对比

特点	狭缝涂布法	刮刀涂布法
溶液粘度要求	20~50000cps	1000~50000cps
液膜厚度范围	1~500μm	120~500μm
墨水管理	密闭式（储液罐）	开放型
原料利用率	较高	较低
可重复性	较好	一般
对基底平整度要求	一般	高

资料来源：《大面积钙钛矿薄膜制备技术的研究进展》，东亚前海证券研究所

2) **真空蒸镀法制备(干法)**: 真空蒸镀是将装有基片的真空室抽成真空,然后加热被蒸发的镀料,使其原子或分子从表面气化逸出,形成蒸气流,入射到基片表面后凝结形成固体薄膜的技术。该方法可以精确地控制钙钛矿薄膜沉积过程中钙钛矿组分的化学计量比,可制备均匀、高质量的钙钛矿薄膜,而且很容易制备大面积钙钛矿薄膜。此外,蒸镀法制备钙钛矿层具有更高的表面覆盖率,更适用于叠层电池。但蒸镀设备价格昂贵,蒸镀法原料利用率及生产效率低,目前还未成为单结钙钛矿太阳能电池制作的主流选择。

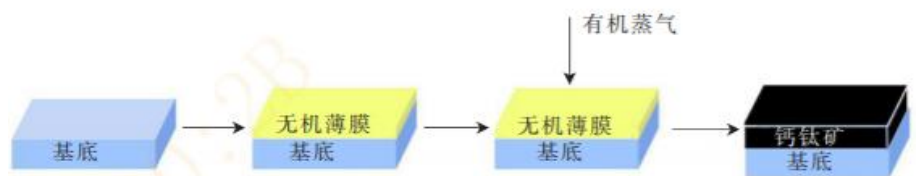
图表 23. 干湿法制备钙钛矿层技术对比

沉积方法	优点	缺点
刮刀涂布法	易于大面积制备,设备要求低,维护简单	溶液利用率低,敞开环境下溶液均一性差
狭缝涂布法	易于大面积制备,可连续生产,材料利用率高	对设备精度要求高
丝网印刷法	易于大面积制备,涂覆过程简单	溶液利用率低,对丝网精度要求较高
喷涂法	易于大面积制备,设备成本低	材料利用率低,易造成腔室污染,可重复性较差
喷墨打印法	材料利用率高,实现定制化生产	生产效率低,喷墨头的维护与更换复杂,难以控制结晶结果
软覆盖沉积法	可大面积制备,无需溶液	材料利用率低,生产效率低
气相沉积法	薄膜质量较高,可精准控制	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》,东亚前海证券研究所

3) **气相辅助溶液法(干湿法结合)**: 2013年, Yang 课题组提出了该方法,即溶液法与蒸镀法混合的新方法,具体流程:将含 PbI₂ 的 DMF 溶液旋涂到 TiO₂ 上,然后在 150 摄氏度的 CH₃NH₃I 蒸汽中热处理两个小时制得钙钛矿膜。广义来看,该方法首先将卤化铅前驱体薄膜通过旋涂、狭缝涂布、刮刀涂布、喷涂、喷墨打印等液相沉积方法沉积在基底上,然后在有机胺卤化物蒸汽中将其完全转化为钙钛矿薄膜。其有效结合了湿法和干法的优势,制备的钙钛矿薄膜比溶液法制备的更加均匀平整,也避免了真空下制备的条件限制,整个过程更经济环保,且适用于可规模化扩展的大面积沉积。

图表 24. 气相辅助溶液法示意图



资料来源:《钙钛矿薄膜制备技术及其在大面积太阳能电池中的应用》,东亚前海证券研究所

湿法凭借成本低和效率高等优势成为较主流的选择，其中狭缝涂布法应用最广泛。总结来看，溶液涂布法（湿法）具有工艺简单、设备成本较低、效率和稳定性较强的优势，但该方法制备的膜的厚度和均匀性不易控制、会出现表面覆盖不全的现象。其中，狭缝涂布法凭借其较高的原料利用率、较好的可重复性等优点，成为目前产业中较为主流的选择，采用该技术路线的企业包括：协鑫光电、纤纳光电、大正微纳等。涂布设备供应商主要包括德沪涂膜、日本东丽。真空蒸镀法（干法）可以通过控制蒸发源的方法精确调控钙钛矿中各组分化学计量比，保证膜层的均一性，且表面覆盖率更高，更适用于叠层电池，但该方法设备成本较高（国内几乎无成熟的设备供应商）、原料利用率及生产效率低，目前仍未走出实验室，涉及到该技术路线的企业包括：无限光能、极电光能等（干湿法）。蒸镀设备相关布局企业包括：捷佳伟创、京山轻机、欣奕华、奥来德。

图表 25. 涂布/蒸镀设备相关企业及布局进展

技术路线	公司	进展
涂布设备	德沪涂膜	1) 钙钛矿涂膜设备 70%市占率； 2) 协鑫 100MW 钙钛矿产线大尺寸核心狭缝涂布设备供应商，已通过验收； 3) 计划 2023 年建成 20MW 中试线平台和 100MW 涂膜-干燥-结晶工艺平台
	日本东丽	1) 钙钛矿涂膜设备 30%市占率； 2) 中国锂电池进口涂布设备主要供应商之一，涂布技术全球领先
	众能光电	公司目前已与国内大型央企、民营企业和知名高校科研机构累计完成近 200 个单体工艺设备交付，产品包括涂布机、刮涂机、激光刻蚀机、PVD 和 ALD 等
蒸镀设备	大正微纳	经过目前高精密狭缝涂布机的研发和销售，公司实现核心设备自主生产
	捷佳伟创	公司于 2022 年中标全球头部光伏企业的钙钛矿电池蒸镀设备项目，该蒸镀设备核心蒸发源由公司研发团队自主研发，并通过创新性结构设计实现优良的多元共蒸效果
	京山轻机	公司用于实验室，体积较小的团簇式蒸镀设备已量产
	欣奕华	公司大尺寸 Inline 钙钛矿蒸镀机于 2022 年交付，是国内首台全自主研发面世的大尺寸钙钛矿真空镀膜机
	奥来德	公司计划投资 2,900 万元，开发一种用于钙钛矿太阳能电池工艺的薄膜的制备方法和设备

资料来源：各公司公告，东亚前海证券研究所

4.3.2. 镀膜设备：PVD 为最成熟的选择，镀膜设备价值量占比最高

空穴和电子传输层制备技术主要分为 PVD 和 RPD，PVD 为目前最成熟的技术选择。空穴传输层和电子传输层的制备主要包括 PVD 和 RPD，ALD 目前处于研究状态，未来或将应用于钙钛矿电池功能层制备。其中，PVD 又分为真空蒸发镀膜、真空溅射镀膜和真空离子镀膜，其中真空蒸发镀膜和溅射镀膜为制备空穴/电子传输层的主要技术。从三种镀膜技术对比

来看，PVD 为目前较成熟的镀膜技术，具有沉积速率快、成本较低的优势，但该技术制备的薄膜均匀性相对较差。在反式结构中，采用 RPD 制备电子传输层可以减少制作过程中对下方钙钛矿层的影响，但设备成本高于 PVD，单价约是 PVD 设备的 2 倍。ALD 是通过将气相前驱体脉冲交替地通入反应室并在沉积基底上发生表面饱和和化学反应形成薄膜，具有以下优势：1) 三维共形性，广泛适用于不同形状的基底；2) 大面积成膜的均匀性，且致密、无针孔；3) 可实现亚纳米级的薄膜厚度控制。但 ALD 较 PVD/RPD 具有沉积速率慢，成本高的劣势。

图表 26. PVD、ALD 技术比较

项目	PVD	ALD
优势与劣势	<ul style="list-style-type: none"> 1) 沉积速率较快； 2) 薄膜厚度较厚，对纳米级膜厚精度控制差； 3) 镀膜具有单一方向性； 4) 厚度均匀性差； 5) 阶梯覆盖率差 	<ul style="list-style-type: none"> 1) 沉积速率较慢（纳米/分钟）； 2) 原子层级的薄膜厚度； 3) 大面积薄膜厚度均匀性好； 4) 阶梯覆盖率最好； 5) 薄膜致密无针孔
主要应用领域	<ul style="list-style-type: none"> 1) HJT 电池透明电极； 2) 柔性电子金属化、触碰面板透明电极； 3) 半导体金属化 	<ul style="list-style-type: none"> 1) PERC 电池背面钝化层； 2) TOPCon 电池隧穿层、接触钝化层、减反层； 3) 柔性电子介质层、柔性电子封装层； 4) 半导体高 k 介质层、金属栅极、金属互连阻挡层、多重曝光技术

资料来源：微导纳米招股说明书，东亚前海证券研究所

金属电极制备普遍采用 PVD 技术，目前较为成熟。顶电极根据材料分为金属电极和碳电极，金属电极一般采用 PVD（真空热蒸镀）的方式进行沉积，使用该方式制作电极的技术较为成熟，成膜较稳定；而碳电极的制备则可以采用喷涂或者刮涂的方法。

镀膜设备价值量占比最高，RPD 设备国内仅捷佳伟创可供应。以协鑫光电的百兆瓦产线（反式结构）为例，共计使用 3 台镀膜设备（2 台 PVD 镀空穴传输层和电极层，1 台 RPD 镀电子传输层）。其中，PVD 设备单台价格在 1000 万元+左右，RPD 单台价格在 2000 万元左右。综合量、价考虑，镀膜设备在整生产线中价值量占比最高。镀膜设备供应商包括：捷佳伟创、京山轻机、迈为股份、众能光电、湖南红太阳等，其中，RPD 设备国内仅捷佳伟创可以供应。

图表 27. 镀膜设备相关企业及布局进展

公司	进展
捷佳伟创	1) 公司已具备钙钛矿及钙钛矿叠层整线装备的研发和供应能力，设备种类涵盖 RPD、PVD、PAR、CVD、蒸发镀膜及精密狭缝涂布、晶硅叠层印刷等； 2) 公司是 RPD 设备国内唯一供应商，公司于 2021 年中标首个钙钛矿中试设备采购订单；于 2022 年出货首台量产型钙钛矿电池 RPD，并再次中标某领先公司的钙钛矿量产线镀膜设备订单
京山轻机	1) 公司 PVD 设备较为成熟，已供货给部分厂家中试线； 2) 公司 ALD 设备正在研发（与华中科技大学的陈蓉教授团队一起合作），样机正在客户现场进行验证
迈为股份	1) 公司自成立以来即涉足太阳能电池丝网印刷设备领域，公司的太阳能电池丝网印刷生产线成套设备的性能和技术指标已经和进口品牌相当； 2) 公司积极布局 HJT 高效太阳能电池整线设备，自主研发了 HJT 太阳能电池 PECVD 真空镀膜设备、HJT 太阳能电池 PVD 真空镀膜设备等
众能光电	公司目前已与国内大型央国企、民营企业和知名高校科研机构累计完成近 200 个单体工艺设备交付，产品包括涂布机、刮涂机、激光刻蚀机、PVD 和 ALD 等
湖南红太阳	公司首台钙钛矿用 PVD 及 ALD 镀膜设备已于 2022 年成功交付

资料来源：各公司公告，东亚前海证券研究所

4.3.3. 激光设备：钙钛矿对激光精度要求高，激光设备最具确定性

激光工序分为刻蚀和清边，协鑫百兆瓦产线使用 4 台激光设备。钙钛矿太阳能电池的生产过程中，激光工序主要目的分为刻蚀和清边，刻蚀主要目的是阻断导通形成单独的模块，以实现电池片的分片；清边主要目的是对电池边缘做绝缘处理。以协鑫光电的百兆瓦产线为例，共计使用 4 台激光设备，其中 3 台用作激光划线+1 台用作激光清边。具体来看，P1 激光划线主要功能为刻蚀 TCO 层；P2 激光划线主要功能为刻蚀钙钛矿活性层；P3 激光划线主要功能为刻蚀钙钛矿活性层和电极层；P4 为激光清边，激光将边缘清干净后便于后道封装，封装后形成一个完整的电池片。

图表 28. 激光在各环节应用



资料来源：《钙钛矿太阳能电池的产业化进程与展望》，东亚前海证券研究所

钙钛矿电池对激光精度要求高，设备选型中降低热损失为重要因素。钙钛矿电池的厚度远低于（百纳米级别）铜铟镓硒和碲化镉等薄膜电池的厚度（微米级别），故钙钛矿电池对激光精度的要求较高。具体来看，铜铟镓硒电池对激光精度的要求在 3-5 微米，碲化镉电池在 2 微米左右，而钙

钛矿电池的精度要求在 0.3-0.5 微米的级别，较薄膜电池高一个数量级。此外，钙钛矿材料对热较为敏感，对激光器合理选型以最大程度降低热损失显得尤为重要，相关措施包括在 P2、P3 工序中采用皮秒的激光器，该类激光器频率非常高，作用在材料表面的时间非常短，相当于冷光源，对电池片的热损失非常小。

激光设备确定性强，部分厂家已实现整线交付。钙钛矿太阳能电池各功能层技术路线和相关设备未定型，但对于激光设备的需求具有确定性。激光是生产中必不可少的环节，每一种技术路线都需要在生产线上用到 3-4 台激光设备。钙钛矿激光设备供应商包括德龙激光、大族激光、迈为股份、帝尔激光、杰普特等，上述企业均已实现了钙钛矿激光设备的交付。

图表 29. 激光设备相关企业及布局进展

公司	进展
德龙激光	1) 公司首套钙钛矿薄膜太阳能电池生产整段设备（包括 P0 激光打标设备，P1、P2、P3 激光划线设备及 P4 激光清边设备）已于 2022 年交付客户并投入使用，助力客户在国内率先实现百兆瓦级规模化量产； 2) 目前公司正在开发针对钙钛矿薄膜太阳能电池的新一代生产设备，对设备的加工幅面、生产效率等都进行了迭代升级
大族激光	公司在钙钛矿电池行业几家龙头、前沿研究机构均取得激光设备的交付销售，及大尺寸激光加工设备的整线交付
迈为股份	公司定制的钙钛矿激光设备已于 2021 年交付，未来会加大布局
帝尔激光	公司一直保有钙钛矿激光技术储备，公司已于 2022 年完成了钙钛矿工艺设备订单交付
杰普特	1) 公司已于 2021 年 8 月交付了首套柔性钙钛矿模切设备； 2) 公司钙钛矿激光膜切设备已推出第二代产品方案，涵盖 P1-P3 薄膜划切工艺段及 P4 清边工艺四台设备及前后小型自动化设备，第二代方案在线宽可调区间以及加工效率方面相比之前都有较大的提升，目前公司正在广泛与下游客户进行业务拓展

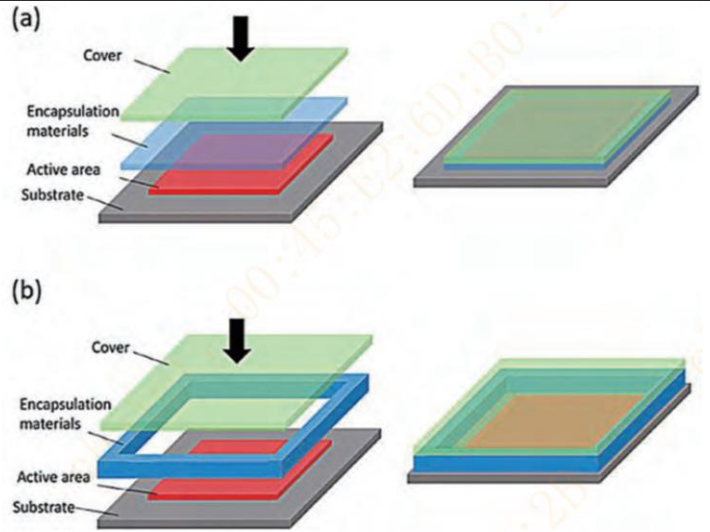
资料来源：各公司公告，东亚前海证券研究所

4.3.4. 封装设备：阻隔性能要求高，对标 OLEDs 封装

钙钛矿电池封装阻隔性能要求高，对标 OLEDs 封装。德沪涂膜董事长在第四届全球钙钛矿电池产业论坛中指出，钙钛矿电池封装阻隔性能要求比晶硅电池高几个量级，与 OLEDs 接近，故其封装可以对标 OLEDs 封装。目前常见的钙钛矿组件封装方式包括：1) 完全覆盖封装，即在模块顶部制备封装层，具有保护效果更好的优势，但对钙钛矿活性层及其他功能层影响较大，且直接接触钙钛矿活性层，透光率要求高；2) 边缘封装，即在模块周围放置密封剂，可以减少对接触层的影响，降低封装材料与钙钛矿材料发生副反应的可能性，同时对材料的透光率要求较低，但封装效果一定程度降低。在边缘封装过程中加入干燥剂是进一步增加阻水效果的方法之

一。目前，布局钙钛矿组件封装设备的企业包括京山轻机、弗斯迈等。

图表 30. 钙钛矿组件封装方式



(a)保护层作为封装材料覆盖活性区；(b)将密封胶置于在活性区边缘^[56]

资料来源：《钙钛矿光伏电池封装材料与工艺研究进展》，东亚前海证券研究所

图表 31. 封装设备相关企业及布局进展

公司	进展
弗斯迈	公司业务板块包括钙钛矿电池组件整线解决方案，包含钙钛矿前道电池生产线及后道组件封装生产线
京山轻机	除了镀膜设备之外，公司还能够提供产线上的玻璃清洗机、钙钛矿干燥设备、组件封装设备等

资料来源：各公司公告，东亚前海证券研究所

5. 产业化进程：技术进步主导，政策+资本加持，产业化进程再提速

5.1. 政策：钙钛矿太阳能电池获国家认可，政策陆续出台助力产业发展

钙钛矿太阳能电池契合行业降本增效主旋律，国家政策助力产业发展。钙钛矿太阳能电池作为第三代新型太阳能电池，具有高转换效率、低成本、应用场景广泛等优势，契合光伏行业降本增效的主旋律，获得了国家的认可。近年来，国家层面出台相关政策推动钙钛矿电池产业发展，例如：2023年1月，《工业和信息化部等六部门关于推动能源电子产业发展的指导意见》中指出“加快智能光伏创新突破，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”；2022年6月，《“十四五”可再生能源发展规划》中提出“掌握钙钛矿等新一代高效低成

本光伏电池制备及产业化生产技术”等。此外，中国光伏行业协会标准化技术委员会成立了钙钛矿光伏标准专题组，并于2023年3月召开了中国光伏行业协会标准化技术委员会钙钛矿光伏标准专题组成立大会暨2023年第一次工作会议。钙钛矿光伏标准专题组的成立有利于推进钙钛矿光伏电池标准化工作，填补钙钛矿光伏电池标准空白，完善钙钛矿光伏领域标准体系，助力钙钛矿光伏产业发展。

图表 32. 钙钛矿太阳能电池领域相关政策/会议及内容

时间	政策及大会	内容
2023/03	中国光伏行业协会标准化技术委员会钙钛矿光伏标准专题组成立大会暨 2023 年第一次工作会议（中国光伏行业协会标准化技术委员会和中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司联合主办）	中国光伏行业协会副秘书长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。
2023/01	《工业和信息化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，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。提出太阳能光伏产品及技术供给能力提升行动，其中包括 统筹开发钙钛矿电池（含钙钛矿/晶硅叠层电池）等高效薄膜电池技术 。开发 BIPV 构件、车船用构件、户外用品等产品，拓展应用领域。
2022/09	《国家发展改革委办公厅 国家能源局综合司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。
2022/08	《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。
2022/08	《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》	能源绿色低碳转型科技支撑行动，新能源发电领域包括： 研发高效硅基光伏电池、高效稳定钙钛矿电池等技术 。
2022/06	《“十四五”可再生能源发展规划》	加强可再生能源前沿技术和核心技术装备攻关， 掌握钙钛矿等新一代高效低成本光伏电池制备及产业化生产技术 。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。
2021/11	《“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 。建设 晶硅/钙钛矿、钙钛矿/钙钛矿等高效叠层电池制备及产业化生产线 ，开展钙钛矿光伏电池应用示范。

资料来源：中国政府网，中国光伏行业协会，东亚前海证券研究所

5.2. 资本：一级市场资金关注度高，头部厂商完成多轮融资

钙钛矿电池组件产业一级市场投资热度高，众多知名投资商入局。目前，钙钛矿太阳能电池组件厂家以非上市公司为主，一级市场投资热度较

高。从融资进展来看，部分头部厂家已完成多轮融资，融资进展快，例如：协鑫光电、纤纳光电分别进展到 B+轮、D 轮。从交易对手来看，知名投资商入局钙钛矿电池产业，例如：协鑫光电 B 轮、B+轮集结了腾讯投资、Temasek 淡马锡、红杉中国、IDG 资本等。钙钛矿产业处于发展初期，资本助力将加快推进产业化进程。

图表 33. 钙钛矿太阳能电池企业融资进展

公司	轮次	披露时间	交易对手
协鑫光电	天使轮	2020.05.27	昆高新集团
	A 轮	2020.07.15	凯辉汽车基金、协鑫光电
	A+轮	2020.10.20	瑞庭投资
	Pre-B 轮	2021.03.09	凯辉汽车基金
	B 轮	2022.05.13	腾讯投资
	B+轮	2022.12.24	Temasek 淡马锡、红杉中国、IDG 资本、川流投资、协鑫科技、世豪投资
纤纳光电	种子轮	2015.08.28	德石投资
	天使轮	2017.11.27	网新投资
	Pre-A 轮	2018.07.02	余杭基金
	A 轮	2019.01.03	三峡基金
	A+轮	2019.09.30	海邦投资
	B 轮	2020.12.09	招银国际资本
	C 轮	2021.01.25	三峡资本、京能同鑫、衢江区金投控股、招银国际资本、衢州绿色产业引导基金
极电光能	D 轮	2022.10.09	招银国际资本、杭开控股、招银电信基金、锦聚投资、普华资本、君度投资、昆仑资本、德石投资、秦兵投资、长江证券、华道创投、乾灵投资、海邦沅华、长江创新投资
	Pre-A 轮	2021.10.13	碧桂园创投、九智投资、建银国际、锡创投、稳晟科技
	A 轮	2023.03.09	深创投、鼎晖百孚、建银国际、锡创投、九智投资、中鑫能源
无限光能	种子轮	2022.02.16	清华控股
	天使轮	2022.06.09	耀途资本、光跃投资、碧桂园创投
万度光能	A 轮	2023.01.05	盈睿资本
	天使轮	2016.10.10	昌达产业基金
大正微纳	股权融资	2021.08.25	宜昌产投
光晶能源	A 轮	2022.01.29	永昌盛投资
脉络能源	天使轮	2022.11.21	正轩投资、创新工场、鼎祥资本
仁烁光能	天使轮	2022.11.09	国新思创、凡创资本、国华三新、高捷资本
	Pre-A 轮	2022.08.26	三行资本、中科创星、苏高新创投集团、金浦投资、险峰 K2VC、云启资本、中投中财基金、中财鼎晟、道禾长期投资
曜能科技	天使轮	2018.03.21	启迪之星创投
	A 轮	2021.08.02	高瓴创投
	B 轮	2022.03.29	源码资本、高瓴资本

资料来源：企名片，东亚前海证券研究所

5.3. 厂商进展：百兆瓦产线落地，GW级产线有望在未来两年内落地

头部厂家百兆瓦产线已落地，GW级产线有望在明后年落地。目前部分领先的钙钛矿太阳能电池组件厂家如协鑫光电、纤纳光电、极电光能等已形成了百兆瓦级别的生产能力，纤纳光电更是已有钙钛矿组件出货，且各厂商研发和量产效率正在持续爬坡中。百兆瓦产线落地及投产出货是钙钛矿太阳能电池组件从实验室走向商业市场的第一步，是产业化的重要进展之一。根据头部厂商扩产计划，预计于明后年有望陆续落地GW级生产线，进一步推动钙钛矿太阳能电池规模化生产。

图表 34. 钙钛矿电池企业梳理（不完全统计）

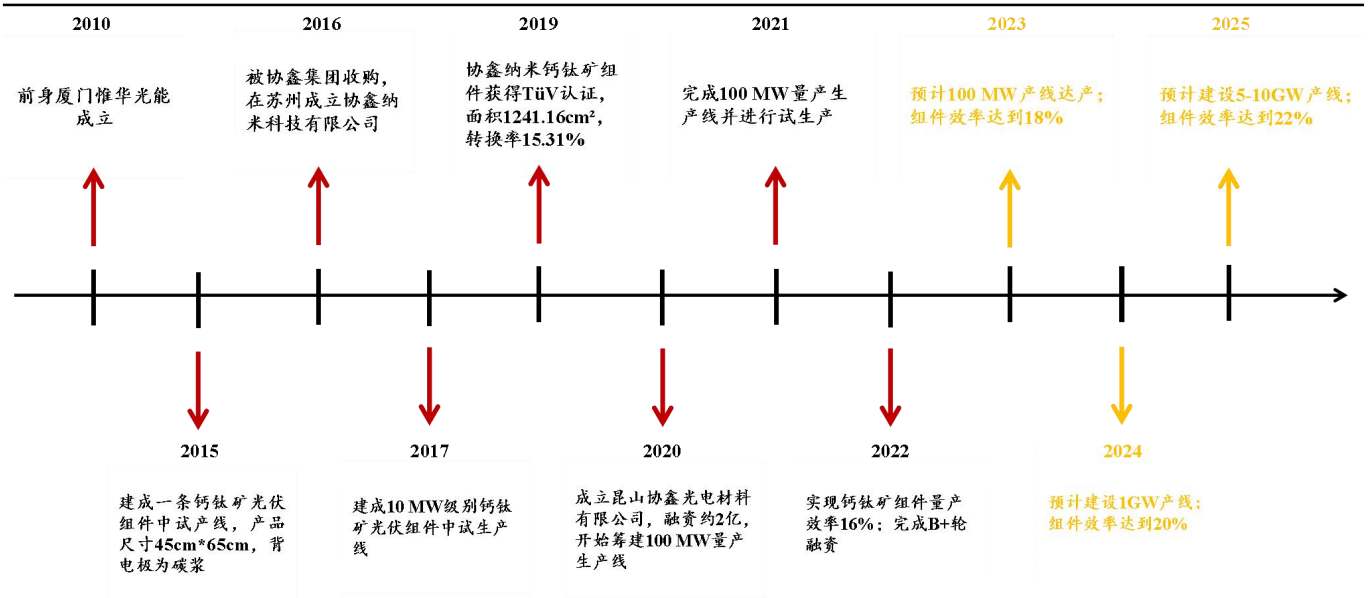
公司	路线	研发团队	中试线	量产线	规划产能	尺寸	组件转换效率	融资进展
协鑫光电	单结	三位创始人均毕业于清华大学化学系，董事长范斌博士师从染料敏化太阳能电池之父Michael Grätzel	2017年建成全球首条10MW中试线	2021年建成100MW量产线	GW级产线有望2024年落地；2025年建设5-10GW产线	1m*2m	目前量产效率16%，2023年目标效率18%	B+
纤纳光电	单结	创始人兼CEO姚冀众博士毕业于帝国理工大学物理系，首席科学家毕业于美国加州大学洛杉矶分校	2020年建成20MW中试线	2021年建成100MW量产线，2022年5000片钙钛矿α组件出货	衢州基地规划产能5GW；GW级产线有望2024年落地	0.6m*1.2m	21.8%@19.35cm ² （国际权威机构JET检测认证）	D
极电光能	单结	联合创始人、总裁于振瑞博士拥有30余年光伏行业从业经验，全球钙钛矿领域知名科学家、国际知名院士Mohammad Khaja Nazeeruddin教授为公司首席科学家		2022年150MW生产线投产	GW级产线有望2024年落地；2026年底达到10GW产能	0.6m*1.2m	19.9%@809.8cm ² （国际权威机构JET检测认证）	A
无锡众能	单结	聚集了清华大学、华中科技大学、大连理工大学等国内多所高校的高端人才		200MW量产线正在建设和调试		1.1m*1.3m	21%@58.50cm ²	
无限光能	单结	联合创始人兼首席科学家、清华大学电机系易陈谊副教授曾师从染料敏化太阳能电池之父Michael Grätzel	10MW实验线已建成	100MW产线将于2023年建成				A
万度光能	单结（介孔型）	董事长兼总经理韩宏伟教授，华中科技大学二级教授，长江学者特聘教授，万人计划科技创新领军人才	200MW		2GW生产基地于2023年2月动工			股权融资
大正微纳	单结（柔性）	首席技术官李鑫博士毕业于清华大学，曾在瑞士洛桑联邦理工学院攻读博士学位、担任日本东京大学“宫坂力”课题组访问学者	2022年10MW生产线量产	2022年100MW生产线开始建设			21%@2400cm ²	A
光晶能源	单结	董事长兼CEO黄福志教授为武汉理工大学先进薄膜光伏研究中心主任	10MW小试线（30cm×30cm）已建成	预计2023年投建100MW产线（60cm×120cm）；预计2024年实现100MW产线量产的目标		0.6m*1.2m		天使轮
脉络能源	单结	创始人麦耀华教授现任暨南大学新能源技术研究院院长		计划于2023年建设100MW钙钛矿电池产线	预计未来五年内实现GW级钙钛矿电池组件量产线的建设			天使轮
仁烁光能	全钙钛矿叠层（行业唯一）	创始人、董事长谭海仁教授为南京大学现代工程与应用科学学院教授、博士生导师，荷兰代尔夫特理工大学博士，加拿大多伦多大学博士后	2023年全钙钛矿叠层光伏组件10MW研发线正式投产（30cm×40cm）	150MW量产线预计2023年Q4投产，2024年实现量产		0.6m*1.2m	0.29	pre-A
合特光电（抗萧钢构）	异质结/钙钛矿叠层	创始人张群芳是首批在太阳能电池及组件技术产品领域留学深造的海归学子		预计2023年100MW产线投产			28%（目标转换效率）	
曜能科技	钙钛矿/晶硅叠层	团队创始人均来自于清华大学、北京大学					小面积钙钛矿/晶硅两端叠层电池稳态输出效率达到32.44%	B
宝馨科技	叠层	与张春福、朱卫东教授团队签订合作协议，张春福教授是西安电子科技大学的华山领军教授，朱卫东是西安电子科技大学的微电子学院副教授		计划2023年启动100MW钙钛矿叠层线的建设	力争4年内实现钙钛矿/异质结叠层电池GW级量产目标			
皇氏集团	TOPCon/钙钛矿叠层	与黑晶光电合作					2023年效率达到26%以上、2024年达到27%以上、2025年达到29%以上，最终目标实现36%以上	

资料来源：各公司公告，企名片，东亚前海证券研究所

5.3.1. 协鑫光电：全球首条大尺寸 100MW 量产线建设者，组件量产效率已达 16%

协鑫光电：从公司发展进程来看，公司前身厦门惟华光能成立于 2010 年，于 2017 年建成 10MW 级别钙钛矿光伏组件中试线，于 2021 年建成 100 MW 量产生产线并进行试生产，于 2022 年达到 16% 的量产效率。从团队背景来看，公司三位创始人均毕业于清华大学化学系，董事长范斌博士师从染料敏化太阳能电池之父 Michael Grätzel 教授。从公司产能规划及目标效率来看，公司预计到 2023 年将实现 100MW 生产线达产，量产效率达到 18%；预计到 2024 年建成 1GW 产线，量产效率爬升至 20%；预计到 2025 年建设 5-10GW 产线，量产效率进一步上升至 22%。

图表 35. 协鑫光电发展进程及产能规划

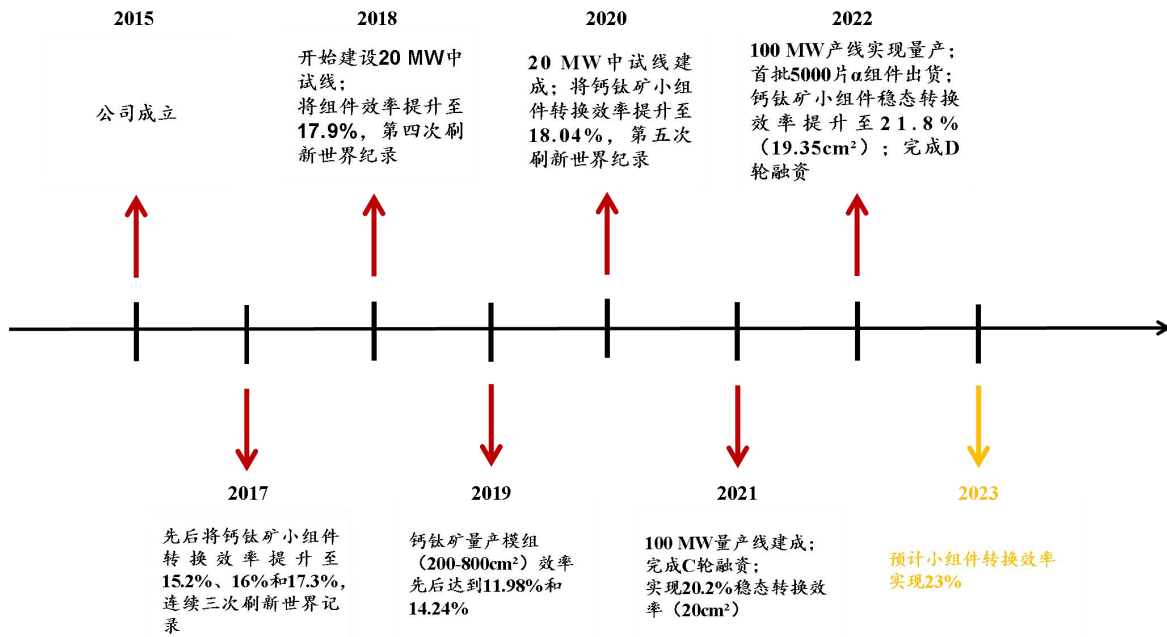


资料来源：协鑫光电公司官网，东亚前海证券研究所

5.3.2. 纤纳光电：率先实现钙钛矿组件出货，多次刷新钙钛矿小组件效率记录

纤纳光电：从公司发展进程来看，公司成立于 2015 年，于 2018 年开始建设 20MW 中试线并于 2020 年建成，于 2021 年建成 100 MW 量产线，于 2022 年投产 100 MW 量产线，并出货首批 5000 片 α 组件，且将钙钛矿光伏小组件（19.35cm²）稳态转换效率提升至 21.8%，已是公司第七次刷新转换效率的世界记录。从团队背景来看，创始人兼 CEO 姚冀众博士毕业于帝国理工大学物理系，联合创始人兼 CTO 颜步一博士毕业于阿卜杜拉国王科技大学，首席科学家杨旻博士毕业于美国加州大学洛杉矶分校。从公司产能规划及目标效率来看，公司预计 2023 年实现钙钛矿光伏小组件转换效率 23%；公司 GW 级产线正在持续推进中。

图表 36. 纤纳光电发展进程及产能规划

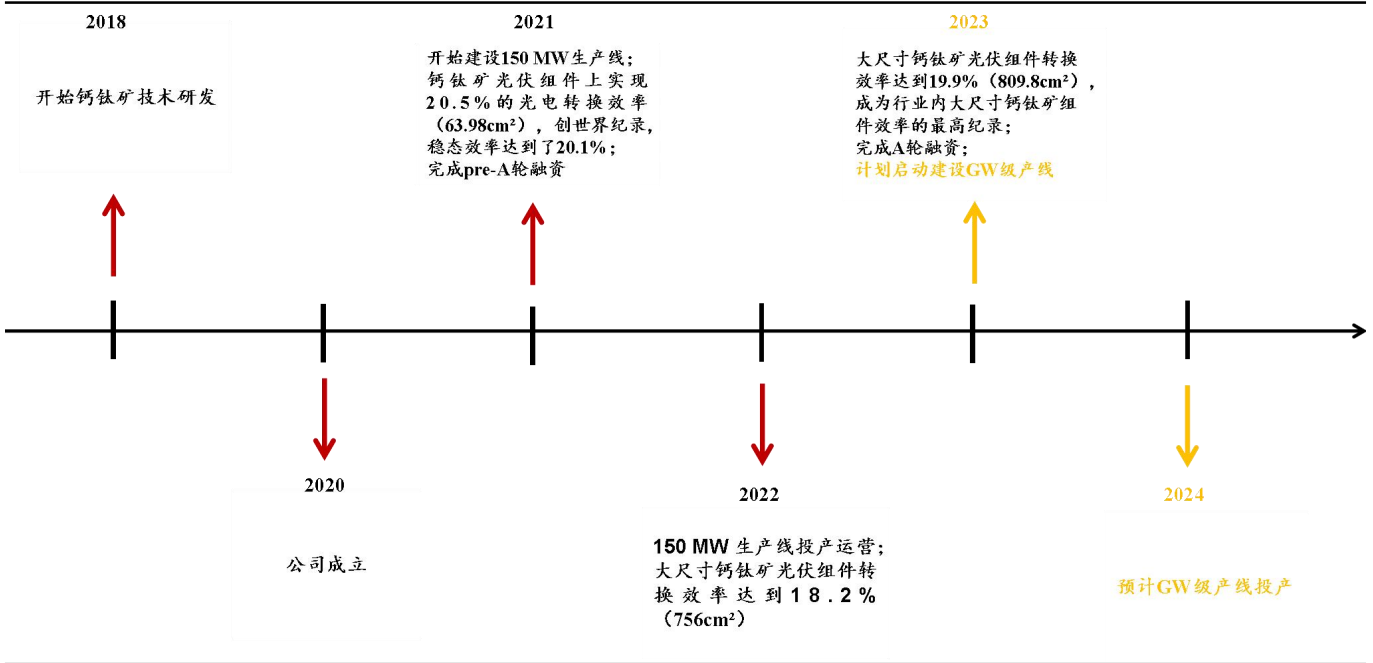


资料来源：纤纳光电公司官网，东亚前海证券研究所

5.3.3. 极电光能：全球规模最大的钙钛矿光伏组件生产线建设者，GW级产线有望2024年投产

极电光能：从公司发展进程来看，公司起源于长城控股集团，于2018年开始钙钛矿技术研发，于2020年落地无锡，于2021年开始建设150MW生产线，且在钙钛矿光伏组件（63.98cm²）上实现20.5%的转换效率，创下当时世界记录，于2022年投产150MW生产线（全球产能规模最大的钙钛矿光伏组件生产线），在大尺寸（756cm²）光伏组件上实现转换效率18.2%。目前，公司150MW生产线处于工艺调试和小批量出货阶段。从团队背景来看，联合创始人、总裁于振瑞博士拥有30余年光伏行业从业经验，公司首席科学家为全球钙钛矿领域知名科学家、国际知名院士 Mohammad Khaja Nazeeruddin 教授。从公司产能规划及目标效率来看，公司计划于2023年启动GW级产线建设；预计到2024年GW级产线投产。

图表 37. 极电光能发展进程及产能规划

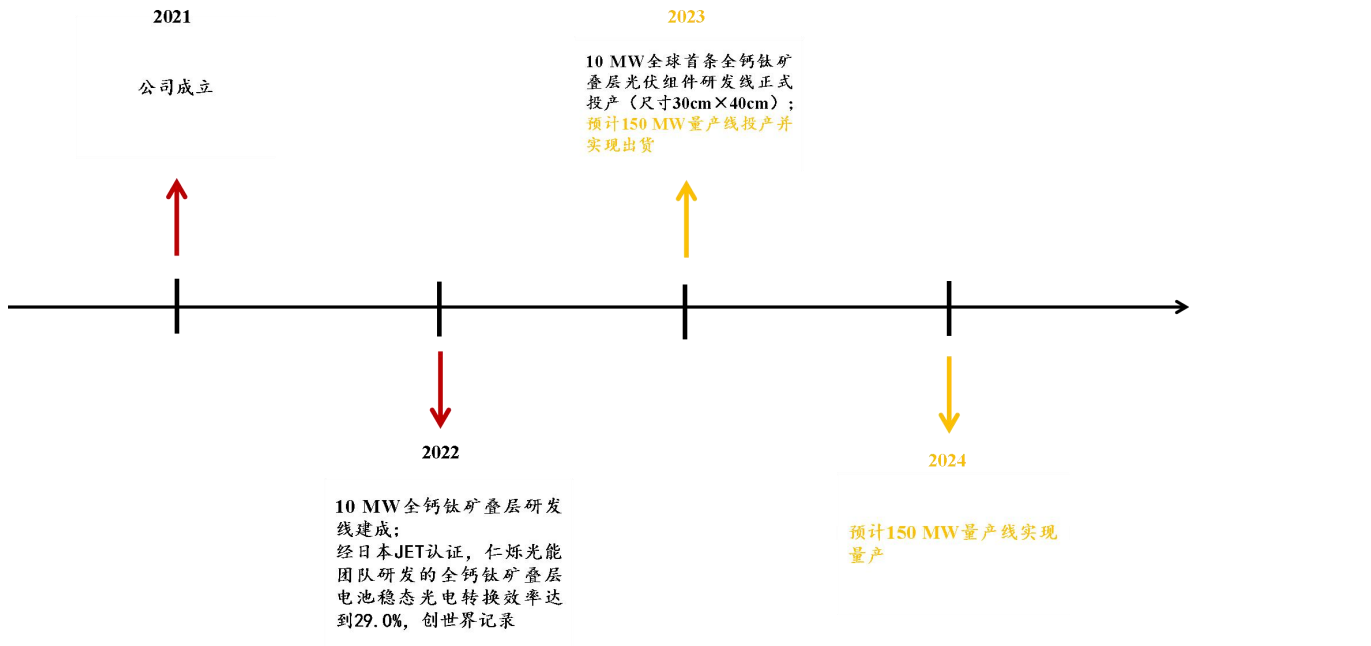


资料来源：极电光能公司官网，东亚前海证券研究所

5.3.4. 仁烁光能：全球首条全钙钛矿叠层光伏组件研发线建设者，预计今年 150MW 产线投产

仁烁光能：从公司发展进程来看，公司成立于 2021 年，于 2022 年建成 10MW 全钙钛矿叠层研发线，且研发的全钙钛矿叠层电池实现 29.0% 的稳态光电转换效率，创下世界记录。截至目前，公司建设的全球首条全钙钛矿叠层光伏组件研发线已正式投产，组件尺寸 30*40cm²。从团队背景来看，创始人、董事长谭海仁教授为南京大学现代工程与应用科学学院教授、博士生导师，荷兰代尔夫特理工大学博士，加拿大多伦多大学博士后。公司背靠南京大学、复旦大学、中科院等知名高校和科研机构，核心管理团队有着丰富的光伏领域从业经验。从公司产能规划及目标效率来看，公司预计 150 MW 生产线将于 2024 年量产。

图表 38. 仁烁光能发展进程及产能规划



资料来源：仁烁光能公司官网，东亚前海证券研究所

6. 投资建议

钙钛矿太阳能电池产业仍处于 0-1 阶段，我们认为在产业发展初期，基于率先释放业绩角度的考虑，建议抓住核心设备和核心辅材两条投资主线，后期建议关注电池组件企业。

投资主线一：核心设备。钙钛矿设备企业已实现出货和交付，率先受益于新技术发展。其中，生产流程中涉及到的核心设备包括镀膜设备、涂布/蒸镀设备和激光设备。1) 目前虽各功能层的制备技术路线未定型，但选择任何技术路线都需要应用激光设备，且钙钛矿电池激光精度要求高于晶硅和薄膜电池，具有较高的技术门槛，建议关注已具备钙钛矿电池激光技术的相关企业：德龙激光、大族激光、迈为股份、帝尔激光、杰普特等；2) 钙钛矿层制备是生产过程中的核心环节，其成膜质量直接决定了电池的转换效率，目前产业化选择包括涂布设备（主要）和蒸镀设备，主流涂布设备供应商为非上市公司，蒸镀设备供应商建议关注捷佳伟创、京山轻机、奥来德等；3) 镀膜设备价值量占比最高，但具体镀膜工艺（PVD 溅射、PVD 蒸镀、RPD、ALD 等）选择仍具有不确定性，建议关注具备相关技术的企业：捷佳伟创、京山轻机、迈为股份等。

投资主线二：核心辅材。1) TCO 导电玻璃：钙钛矿太阳能电池结构决定了 TCO 导电玻璃为必要选择，建议关注主流供应商：金晶科技、耀皮玻璃；2) 靶材：是镀膜的核心原材料，在钙钛矿太阳能电池中的应用主要包括 TCO 层、空穴传输层、电子传输层和顶电极制备环节，TCO 层的存在激发了 ITO 靶材的增量需求，建议关注相关企业：隆华科技、阿石创；3) POE

胶膜：钙钛矿组件对于水汽阻隔的要求较高，且EVA会降解产生醋酸影响钙钛矿层性能，故不能采用传统的晶硅组件EVA胶膜封装，建议关注具有POE胶膜生产能力的企业：福斯特、海优新材、赛伍技术、明冠新材等；4) 丁基胶：钙钛矿组件对于水汽阻隔的要求较高，传统晶硅组件封装使用的硅胶只能隔离液态水，不能隔绝水汽，故不能在钙钛矿组件封装中采用，而丁基胶具有良好的水汽隔绝能力，更适用于钙钛矿组件，建议关注相关企业：康达新材。

图表 39. 核心标的估值表 (Wind 一致预期)

细分板块	股票代码	股票名称	归母净利润 (亿元)			PE (参考3月22日股价)		
			2022E	2023E	2024E	2022E	2023E	2024E
设备	688170.SH	德龙激光	0.67	1.20	1.76	72.00	41.62	28.37
	002008.SZ	大族激光	13.85	18.16	22.88	22.52	17.17	13.63
	300751.SZ	迈为股份	9.33	15.74	23.59	57.91	34.31	22.89
	300776.SZ	帝尔激光	5.00	7.21	10.19	38.27	26.55	18.78
	688025.SH	杰普特	0.81	1.97	2.79	51.15	26.28	18.50
	300724.SZ	捷佳伟创	10.05	13.90	17.83	38.85	28.09	21.91
	000821.SZ	京山轻机	2.87	4.34	5.59	47.04	31.06	24.12
	688378.SH	奥来德	1.13	2.21	3.53	45.82	27.05	16.97
TCO导电玻璃	600586.SH	金晶科技	5.08	8.83	11.90	25.46	14.65	10.88
	600819.SH	耀皮玻璃	0.50					
靶材	300263.SZ	隆华科技	4.41	3.09	4.60	16.63	23.74	15.96
	300706.SZ	阿石创	0.21	0.70	1.13	210.64	62.17	38.49
POE胶膜	603806.SH	福斯特	24.65	34.96	42.17	32.04	22.59	18.73
	688680.SH	海优新材	0.50	7.73	10.44	311.94	17.72	13.12
	603212.SH	赛伍技术	3.03	6.02	10.07	37.69	19.00	11.35
	688560.SH	明冠新材	1.04	5.01	7.50	90.03	13.41	8.96
丁基胶	002669.SZ	康达新材	0.50			79.31		

资料来源：Wind，东亚前海证券研究所（2022 年年报已披露的则采取年报内准确数字）

7. 风险提示

提示一：钙钛矿电池产业化进程不及预期。目前钙钛矿电池仍处于 0-1 阶段，产业化进程中仍面临稳定性差、大面积制备效率下降等痛点，若这些问题无法得到解决，将导致产业化进展缓慢，进而影响行业发展。

提示二：下游需求不及预期。若钙钛矿太阳能电池下游光伏行业或细分的 BIPV、汽车光伏和室内光伏等领域需求景气度下降，将影响行业发展。

提示三：资本投入不及预期。目前钙钛矿电池仍处于 0-1 阶段，仍需大量资金支持以实现产业化发展，若资本不及时到位，则会影响产业化进度，进而影响行业发展。

特别声明

《证券期货投资者适当性管理办法》、《证券经营机构投资者适当性管理实施指引（试行）》已于2017年7月1日起正式实施。根据上述规定，东亚前海证券评定此研报的风险等级为R3（中风险），因此通过公共平台推送的研报其适用的投资者类别仅限定为专业投资者及风险承受能力为C3、C4、C5的普通投资者。若您并非专业投资者及风险承受能力为C3、C4、C5的普通投资者，请取消阅读，请勿收藏、接收或使用本研报中的任何信息。

因此受限于访问权限的设置，若给您造成不便，烦请见谅！感谢您给予的理解与配合。

分析师声明

负责准备本报告以及撰写本报告的所有研究分析师或工作人员在此保证，本研究报告中关于任何发行商或证券所发表的观点均如实反映分析人员的个人观点。负责准备本报告的分析师获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户的反馈、竞争性因素以及东亚前海证券股份有限公司的整体收益。所有研究分析师或工作人员保证他们报酬的任何一部分不曾与，不与，也将不会与本报告中的具体的推荐意见或观点有直接或间接的联系。

分析师介绍

段小虎，东亚前海证券新兴产业组首席与电新组首席，兼任海外首席。研究所助理总经理/执行董事。复旦大学与巴黎第一大学硕士。曾获2017年新财富第2名，水晶球奖第4名，中国证券业金牛分析师第4名；2018年新财富第4名，2018年Wind金牌分析师第3名。

投资评级说明

东亚前海证券行业评级体系：推荐、中性、回避

推荐： 未来6—12个月，预计该行业指数表现强于同期市场基准指数。

中性： 未来6—12个月，预计该行业指数表现基本与同期市场基准指数持平。

回避： 未来6—12个月，预计该行业指数表现弱于同期市场基准指数。

市场基准指数为沪深300指数。

东亚前海证券公司评级体系：强烈推荐、推荐、中性、回避

强烈推荐： 未来6—12个月，预计该公司股价相对同期市场基准指数涨幅在20%以上。该评级由分析师给出。

推荐： 未来6—12个月，预计该公司股价相对同期市场基准指数涨幅介于5%—20%。该评级由分析师给出。

中性： 未来6—12个月，预计该公司股价相对同期市场基准指数变动幅度介于-5%—5%。该评级由分析师给出。

回避： 未来6—12个月，预计该公司股价相对同期市场基准指数跌幅在5%以上。该评级由分析师给出。

市场基准指数为沪深300指数。

分析、估值方法的局限性说明

本报告所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。本报告采用的各种估值方法及模型均有其局限性，估值结果不保证所涉及证券能够在该价格交易。

免责声明

东亚前海证券有限责任公司经中国证券监督管理委员会批复，已具备证券投资咨询业务资格。

本报告由东亚前海证券有限责任公司（以下简称东亚前海证券）向其机构或个人客户（以下简称客户）提供，无意针对或意图违反任何地区、国家、城市或其它法律管辖区域内的法律法规。

东亚前海证券无需因接收人收到本报告而视其为客户。本报告是发送给东亚前海证券客户的，属于机密材料，只有东亚前海证券客户才能参考或使用，如接收人并非东亚前海证券客户，请及时退回并删除。

本报告所载的全部内容只供客户做参考之用，并不构成对客户的投资建议，并非作为买卖、认购证券或其它金融工具的邀请或保证。东亚前海证券根据公开资料或信息客观、公正地撰写本报告，但不保证该公开资料或信息内容的准确性或完整性。客户请勿将本报告视为投资决策的唯一依据而取代个人的独立判断。

东亚前海证券不需要采取任何行动以确保本报告涉及的内容适合于客户。东亚前海证券建议客户如有任何疑问应当咨询证券投资顾问并独自进行投资判断。本报告并不构成投资、法律、会计或税务建议或担保任何内容适合客户，本报告不构成给予客户个人咨询建议。

本报告所载内容反映的是东亚前海证券在发表本报告当日的判断，东亚前海证券可能发出其它与本报告所载内容不一致或有不同结论的报告，但东亚前海证券没有义务和责任去及时更新本报告涉及的内容并通知客户。东亚前海证券不对因客户使用本报告而导致的损失负任何责任。

本报告可能附带其它网站的地址或超级链接，对于可能涉及的东亚前海证券网站以外的地址或超级链接，东亚前海证券不对其内容负责。本报告提供这些地址或超级链接的目的纯粹是为了客户使用方便，链接网站的内容不构成本报告的任何部分，客户需自行承担浏览这些网站的费用或风险。

东亚前海证券在法律允许的情况下可参与、投资或持有本报告涉及的证券或进行证券交易，或向本报告涉及的公司提供或争取提供包括投资银行业务在内的服务或业务支持。东亚前海证券可能与本报告涉及的公司之间存在业务关系，并无需事先或在获得业务关系后通知客户。

除非另有说明，所有本报告的版权属于东亚前海证券。未经东亚前海证券事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式更改、复制、传播本报告中的任何材料，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为东亚前海证券的商标、服务标识及标记。

东亚前海证券版权所有并保留一切权利。

机构销售通讯录

地区	联系人	联系电话	邮箱
北京地区	林泽娜	15622207263	linzn716@easec.com.cn
上海地区	朱虹	15201727233	zhuh731@easec.com.cn
广深地区	刘海华	13710051355	liuhh717@easec.com.cn

联系我们

东亚前海证券有限责任公司 研究所

北京地区：北京市东城区朝阳门北大街8号富华大厦A座二层

邮编：100086

上海地区：上海市浦东新区世纪大道1788号陆家嘴金控广场1号27楼

邮编：200120

广深地区：深圳市福田区中心四路1号嘉里建设广场第一座第23层

邮编：518046

公司网址：<http://www.easec.com.cn/>