

2024年02月26日

标配

证券分析师

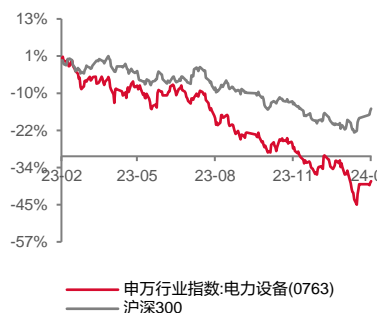
周啸宇 S0630519030001

zhouxiaoy@longone.com.cn

联系人

付天赋

ftfu@longone.com.cn



相关研究

1. 新能源技术趋势深度系列（一）：全球第三次能源转换，未来能源格局之争——氢能源行业发展深度复盘
2. 新能源技术趋势深度系列（二）：时人不识凌云木，直待凌云始道高一——锂电池复合铜箔行业深度
3. 新能源技术趋势深度系列（三）：长时储能东风起，钒电需求待腾飞——电力设备与新能源行业深度

钙钛矿行业深度：徐徐生羽翼，一化北溟鱼

——新能源技术趋势深度系列（四）

投资要点：

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

正文目录

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

图表目录

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

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

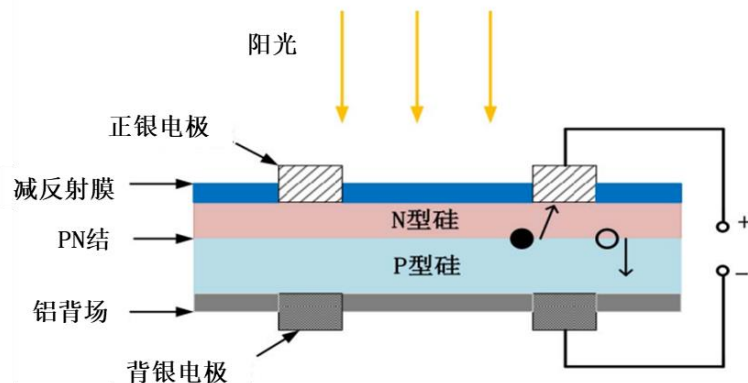
1. 钙钛矿接力成为第三代电池技术

1.1. 光伏电池技术发展

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

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

图1 PERC 晶硅太阳能电池结构



资料来源：帝科股份招股说明书，东海证券研究所

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

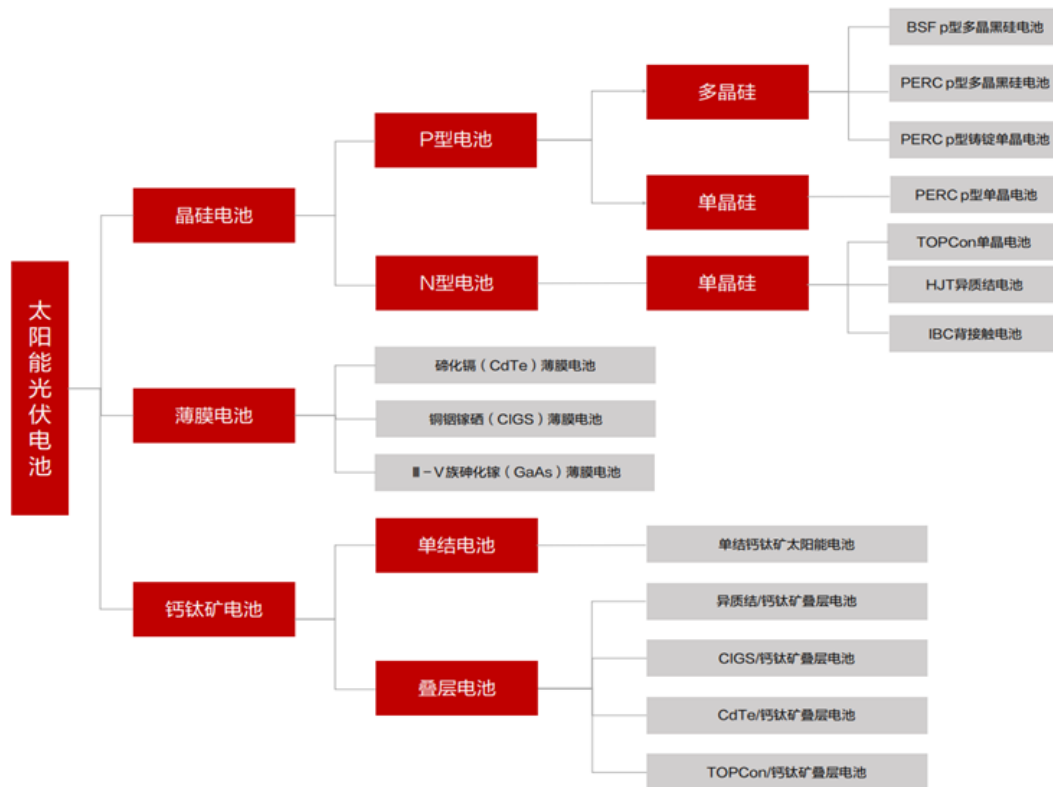
图2 CIGS 薄膜太阳能电池结构



资料来源:《薄膜光伏材料铜铟镓硒的研究进展》(房文健等), 东海证券研究所

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

图3 太阳能技术发展路线图



资料来源: 中国光伏产业发展路线图, 东海证券研究所

表1 三代太阳能电池对比表

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

资料来源: 公开资料整理, 东海证券研究所

1.2. 钙钛矿电池原理

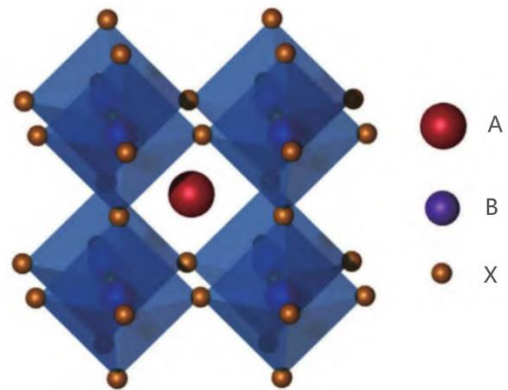
钙钛矿是一类具有与钙钛氧化物相同晶体结构的化合物。其化学结构为 ABX_3 型, A位是有机阳离子, B位是二价金属离子, X位是卤素阴离子。其中A位离子占据了与十二个X离子共用的八面体位置, 而较小的B离子则稳定在与六个卤素阴离子共用的八面体位置。B位通常是 Pb^{2+} 或者 Sn^{2+} 为代表的二价金属离子。X位则通常是 Cl^- 、 Br^- 和 I^- 卤素阴离子。通过调整A、B和X的含量可以获得不同组分的钙钛矿材料, 对应的带隙及能级分布也有所区别。

图4 钙钛矿矿石实物图



资料来源: 太阳能发电网, 东海证券研究所

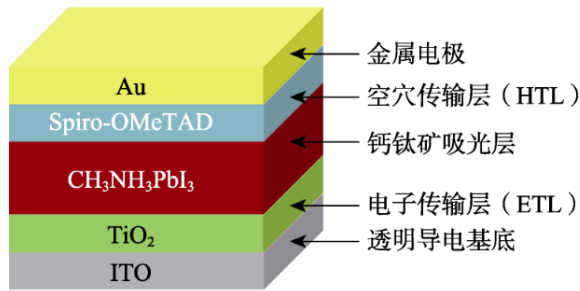
图5 钙钛矿结构的三维示意图



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

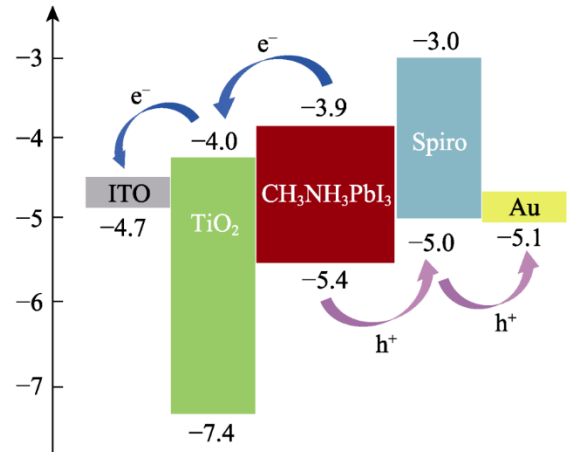
钙钛矿电池利用半导体的光生伏特效应发电。其具体原理是在太阳光的照射下, 具有高吸光系数的钙钛矿吸光层会大量吸收能量大于等于禁带宽度的光子, 使原本束缚在原子核周围的电子从价带顶被激发跃迁到导带底。与此同时, 为保持电中性额外产生了一个带正电荷的空穴, 这对被库仑力束缚的电子-空穴对即为激子。由于钙钛矿的激子结合能较低, 在内建电场的作用下会迅速解离成自由的电子和空穴, 其中自由电子通过电子传输层 (ETL) 向阴极传输, 最后被透明导电氧化物 (TCO) 电极收集; 自由空穴则通过空穴传输层 (HTL) 向阳极传输, 随后被金属电极收集。在外接电路与两端电极连接后, 器件会形成一个电流的回路,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

图6 钙钛矿太阳能电池结构



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

图7 钙钛矿太阳能电池工作原理



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

2.钙钛矿电池的优势与难题

2.1.钙钛矿电池的优势

2.1.1.理论效率更高

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

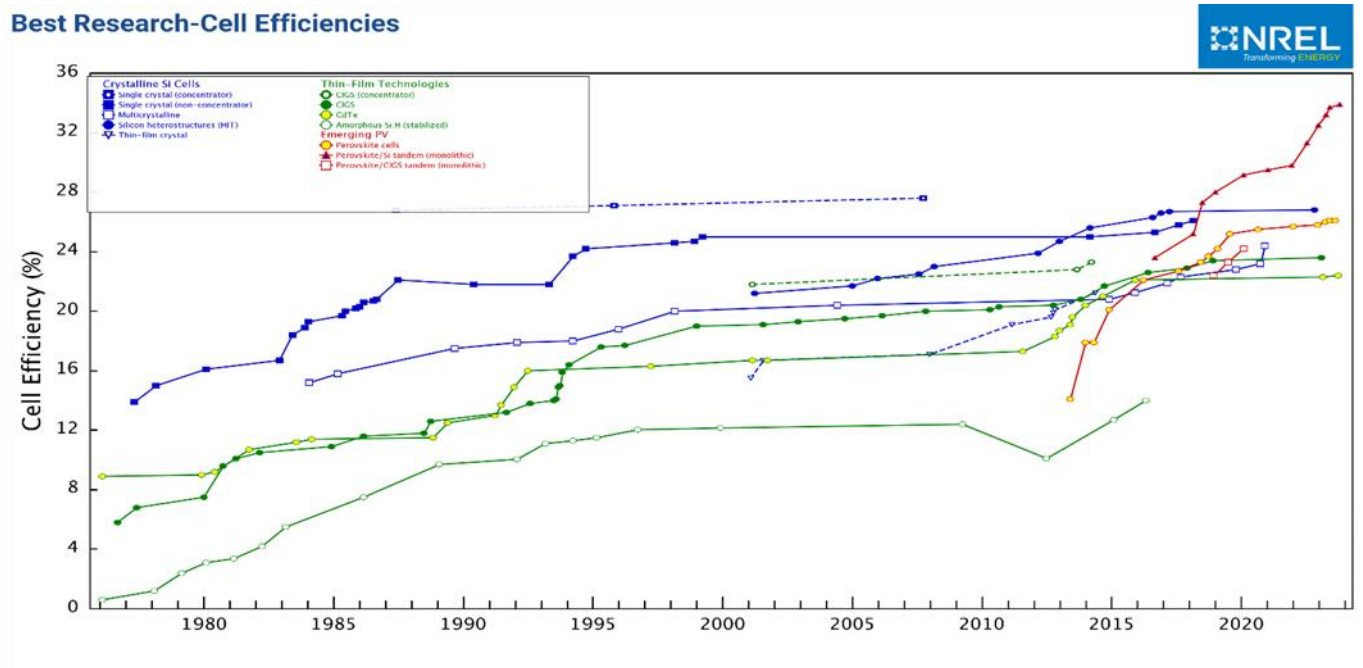
表2 钙钛矿实验室效率提升过程

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

资料来源：东海证券研究所整理

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

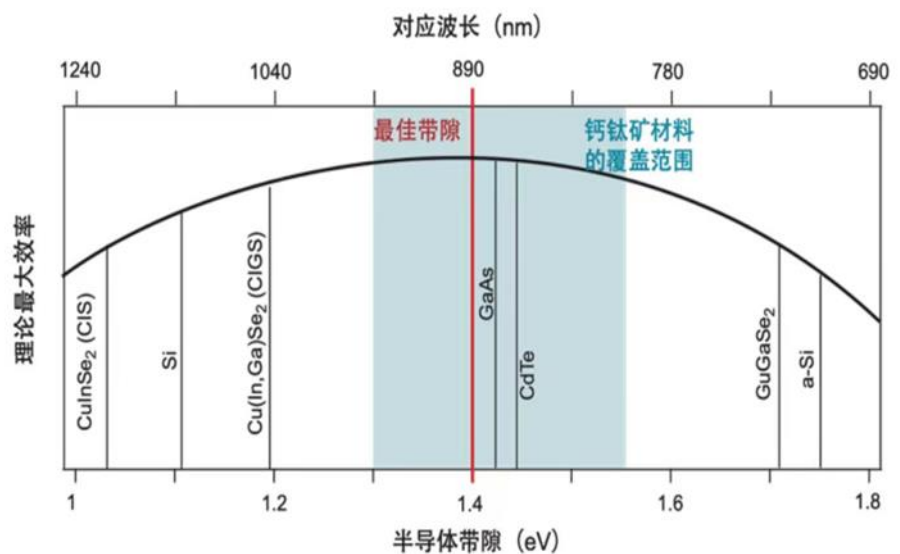
图8 太阳能电池认证效率图（蓝色、绿色和红色分为第一代、二代和三代太阳能电池）



资料来源：NREL，东海证券研究所

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

图9 不同太阳能电池对应带隙



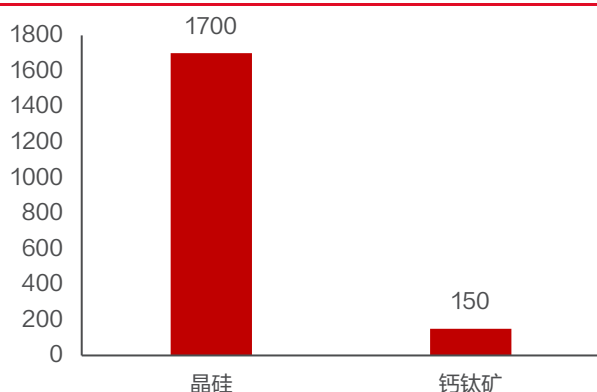
资料来源：索比光伏网，东海证券研究所

2.1.2.理论成本更低

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

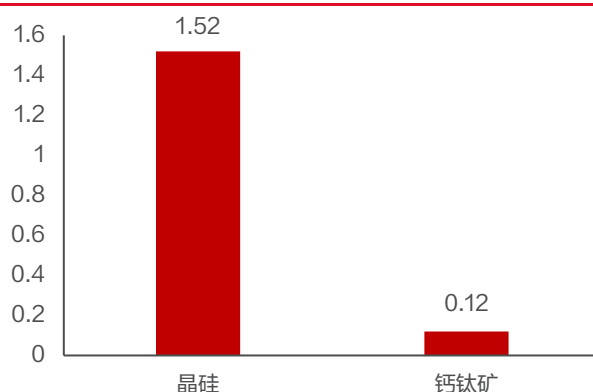
生产端：钙钛矿组件生产能耗低，具有优越的环保性能。钙钛矿组件制造过程中，工艺温度不超过 150℃，工艺流程短，整体能耗极低，每瓦组件能耗约为 0.12kWh，显著优于晶硅组件超过 1.52kWh 每瓦的能耗水平。此外，钙钛矿单结电池的能量回收时间仅为硅基电池的 23%，温室气体排放因子也仅为硅基电池的 43%，突显出钙钛矿组件更为环保的特性。

图10 晶硅和钙钛矿电池工艺温度（单位：℃）



资料来源：协鑫光电，东海证券研究所

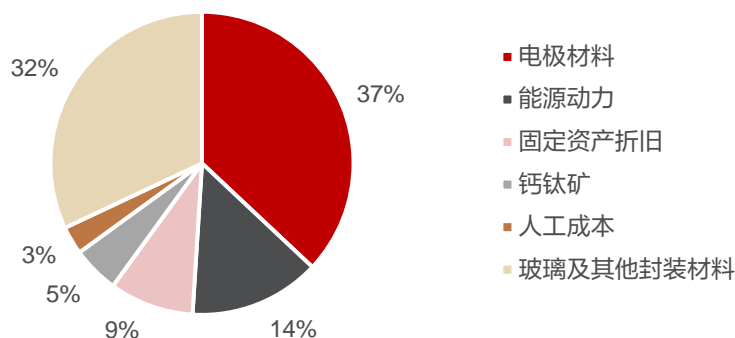
图11 晶硅和钙钛矿电池单瓦能耗（单位：KWh）



资料来源：协鑫光电，东海证券研究所

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

图12 钙钛矿组件成本结构占比情况



资料来源：中商产业研究院，东海证券研究所

2.1.3.应用场景更广

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

图13 光伏屋顶



资料来源：恒通源官网，东海证券研究所

图14 光伏幕墙



资料来源：晶天新能源官网，东海证券研究所

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

图15 车载光伏发电系统（CIPV）



资料来源：泛华新能源，东海证券研究所

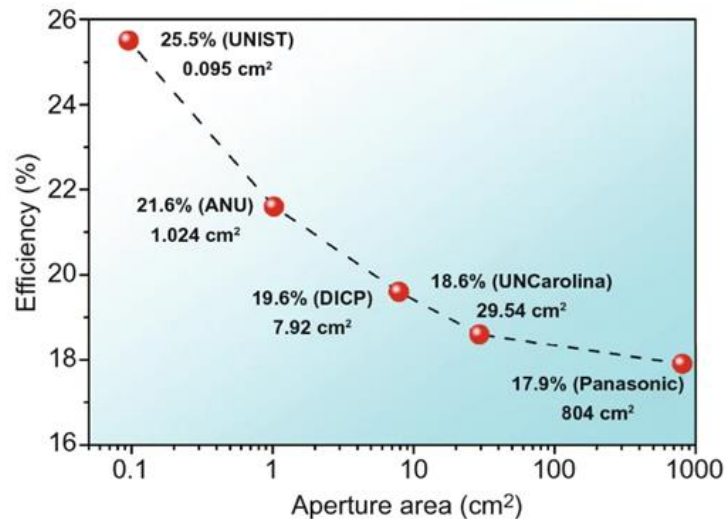
2.2. 钙钛矿电池的产业化难题

2.2.1. 大面积制备效率降低

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

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

图16 钙钛矿电池面积与效率关系

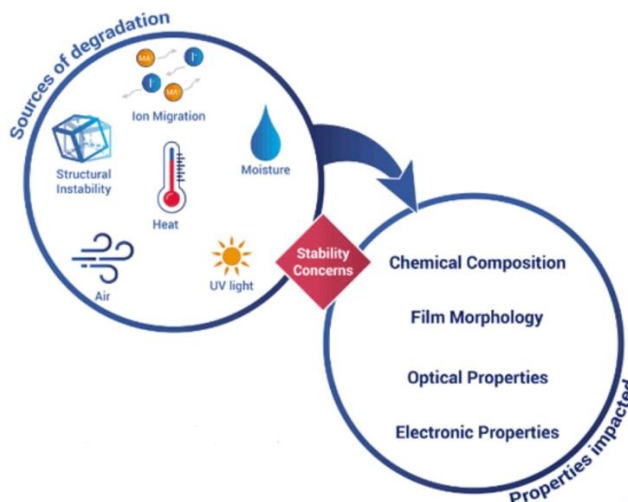


资料来源：SpringerLink，东海证券研究所

2.2.2. 稳定性较差

稳定性是制约钙钛矿电池产业化的重要因素。根据《太阳能钙钛矿电池技术发展和经济性分析》(潘莹, 2022年)中的分析, 目前钙钛矿电池生命周期内持续光照时间最长约 10000h, 若按平均日照时长 4h 计算, 理论寿命仅 6.8 年, 相比晶硅电池 25 年的理论寿命存在较大差距。钙钛矿稳定性差主要受到环境和内部因素的共同影响。一方面, 钙钛矿的吸光层的稳定性受环境因素影响, 表现为易水解、高温易分解、温度变化下相变、光照和氧气作用下发生光致分解等。另一方面, 吸光层会受电子传输层和电极材料影响。以正向结构为例, TiO₂ 作为电子传输层在光照下产生光生空穴催化分解吸光层; Spiro-OMeTAD 作为空穴传输层易受吸光层碘离子扩散影响而电荷传输性能下降; 电极材料常用贵金属, 但金属原子易扩散造成吸光层分解, 且钙钛矿材料具有明显的离子特性, 易发生离子迁移, 吸光层的碘离子也会对金属电极产生腐蚀。

图17 钙钛矿太阳能电池内不稳定性的来源



资料来源：Solar Magazine，IDTechEx，东海证券研究所

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

图18 钙钛矿电池稳定性解决方案



资料来源：势银，东海证券研究所

3.钙钛矿电池制作工艺

3.1.制备流程

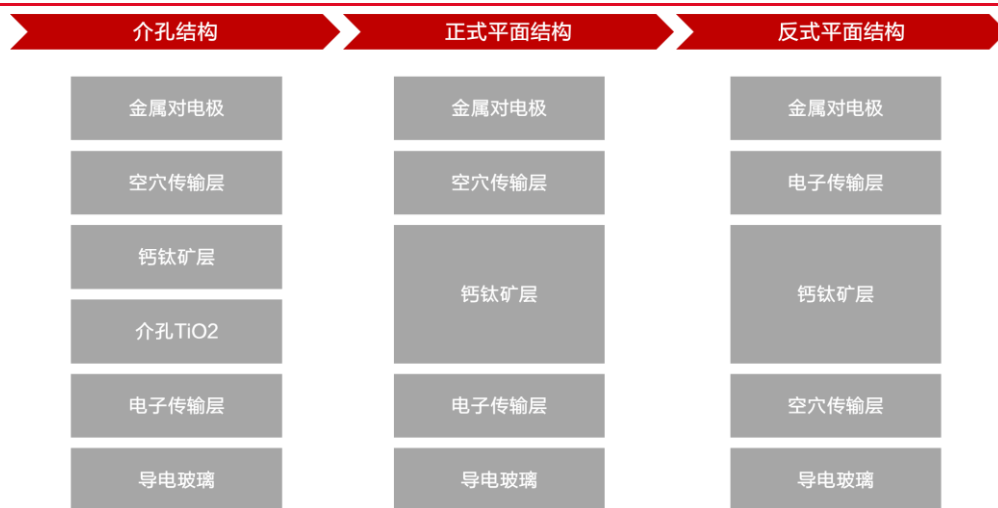
单结钙钛矿电池结构类似三明治层状，结构简单。单结电池在产业化进程中延伸出介孔结构和平面结构两种，其中，平面结构又可分为平面正式结构和平面反式结构。

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

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

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

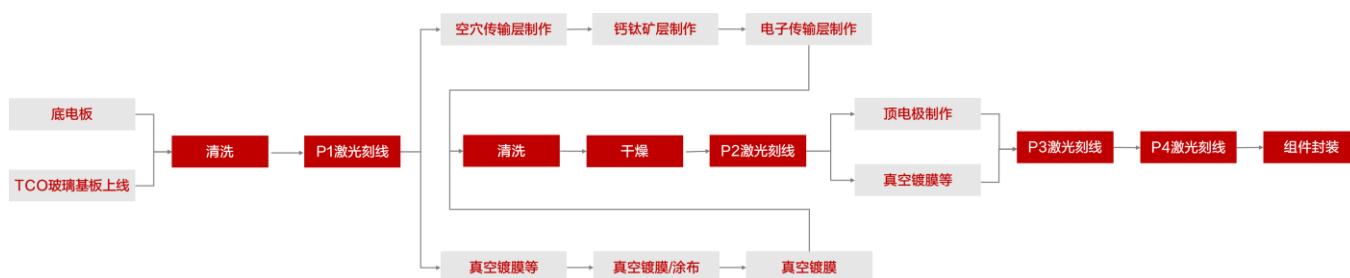
图19 钙钛矿电池结构示意图



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

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

图20 反式平面结构钙钛矿电池制作工序示意图



资料来源：格隆汇，东海证券研究所

3.2. 电极层

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

TCO 镀膜玻璃用作薄膜太阳能电池前电极，具备良好的透光率和导电性能。TCO 镀膜玻璃即透明氧化物导电玻璃，是在平板玻璃表面通过物理或者化学镀膜的方法均匀地镀上一层透明的导电氧化物薄膜，主要包括铟、锡、锌和镉氧化物及其复合多元氧化物薄膜，占薄膜太阳能电池总成本的 24% 左右。按照导电膜材料不同，可分为 ITO 玻璃、FTO 玻璃和 AZO 玻璃，分别采用 In_2O_3 、 SnO_2 和 ZnO 作为靶材。

表3 三类 TCO 玻璃主要材料及特性比较

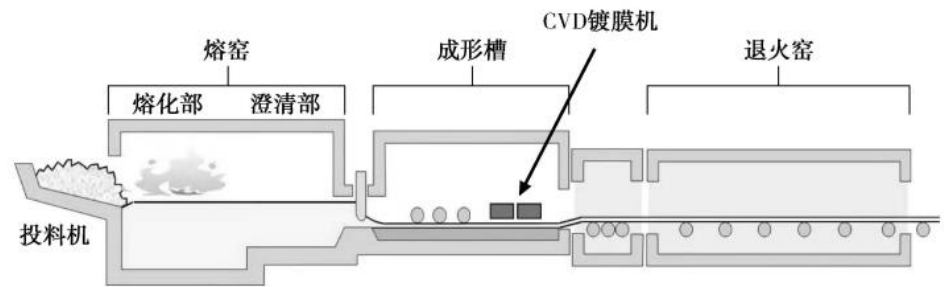
类别	ITO 玻璃	FTO 玻璃	AZO 玻璃
导电膜材料	掺锡的氧化铟 $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ ，稀有元素铟稀缺	掺氟的氧化锡 $\text{SnO}_2:\text{F}$ (掺铋的氧化锡 $\text{SnO}_2:\text{Sb}$)，原料不稀缺	掺铝的氧化锌 $\text{ZnO}:\text{Al}$ ，原料不稀缺
性能	导电性能在目前是最好的，生产成本较高，容易被氧化	很好的绒面结构	成本最高，有很好的透光性和导电特性，性能较好，但不耐潮
生产工艺	磁控溅射 (PVD)	化学气相沉积法 (CVD)	磁控溅射 (PVD)
发展阶段	成功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

资料来源：亚玛顿招股说明书，东海证券研究所

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

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

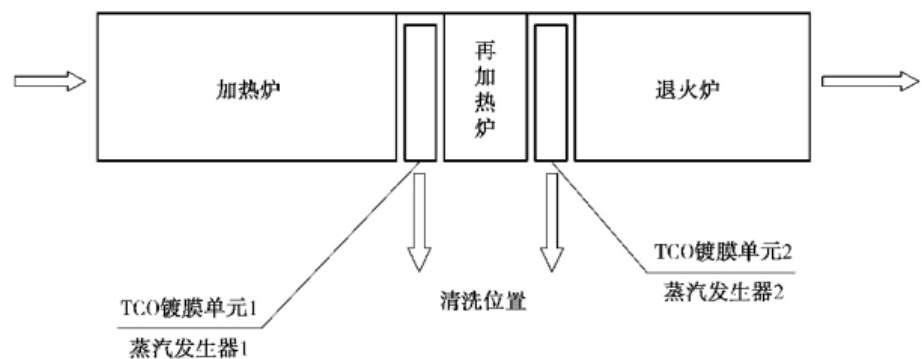
图21 在线镀膜工艺生产图



资料来源：《在线 Low-E&TCO 镀膜玻》（孟庆瑞），东海证券研究所

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

图22 离线 TCO 玻璃生产工艺示意图



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

3.3.空穴传输层

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

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

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

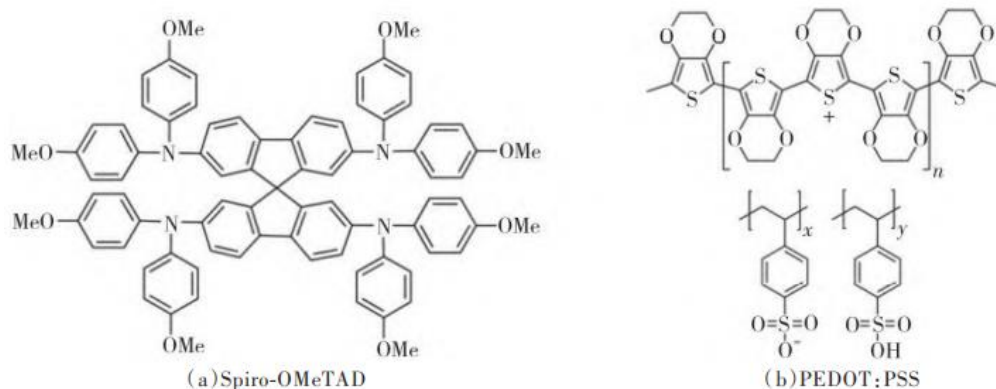
表4 空穴传输层材料

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

资料来源：东海证券研究所整理

目前空穴传输层的研究主要集中于材料开发。从成本角度来看，无机空穴传输层成本较优，CuI、CuSCN、NiO、Cu₂O成本都在 15 千克/美元及以下。从光电转换效率来看，有机空穴传输层转换效率较高，FDT、PTAA、Spiro-OMeTAD、PEDOT:PSS 都在 18%以上，而无机空穴传输材料中 NiObium 转换效率明显优于其他材料。从开路电压来看，有机与无机空穴传输层没有明显区别。从产业化应用来看，在 n-i-p 型钙钛矿太阳能电池中常用的空穴传输材料包括有机小分子（Spiro-OMeTAD），而在 p-i-n 型器件中则常用聚合物（3, 4-乙烯二氧噻吩-聚苯乙烯磺酸酯，PEDOT:PSS）及无机金属氧化物（NiO_x）等作为空穴传输材料。

图23 空穴传输材料的结构示意图



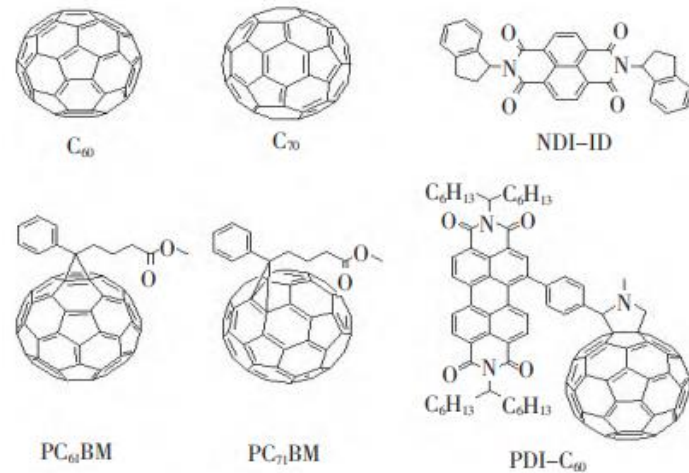
资料来源：《钙钛矿太阳能电池及其空穴传输研究综述》（王茹等），东海证券研究所

3.4. 电子传输层

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

电子传输材料主要分为金属氧化物和有机化合物两大类。金属氧化物材料主要包括TiO₂、ZnO、SnO₂等，具有带隙可调、透光率高、载流子运输能力强等优点，常用于 n-i-p 结构钙钛矿太阳能电池。有机化合物材料主要包括富勒烯及其衍生物、C₆₀、C₇₀和基于萘二酰亚胺（NDI）的小分子等，具有良好的成膜性和优异的电子传输特性等优点，常用于 p-i-n 结构钙钛矿太阳能电池。

图24 典型的有机电子传输材料



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

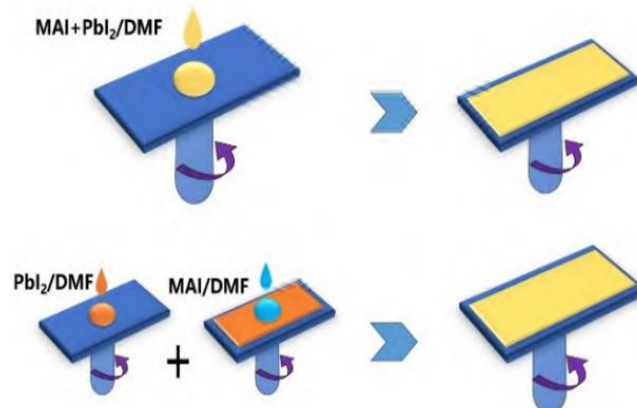
3.5. 钙钛矿层

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

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

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

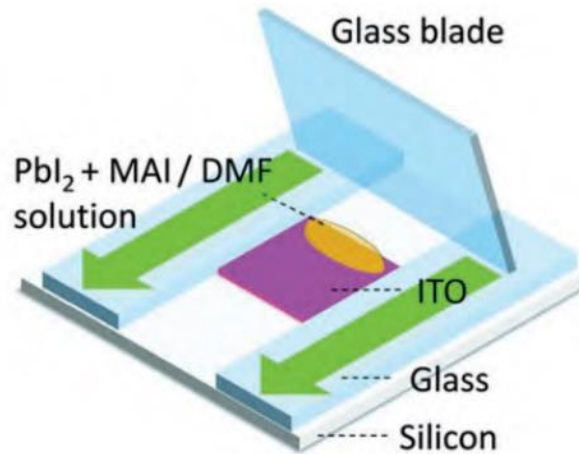
图25 旋涂法制备示意图



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

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

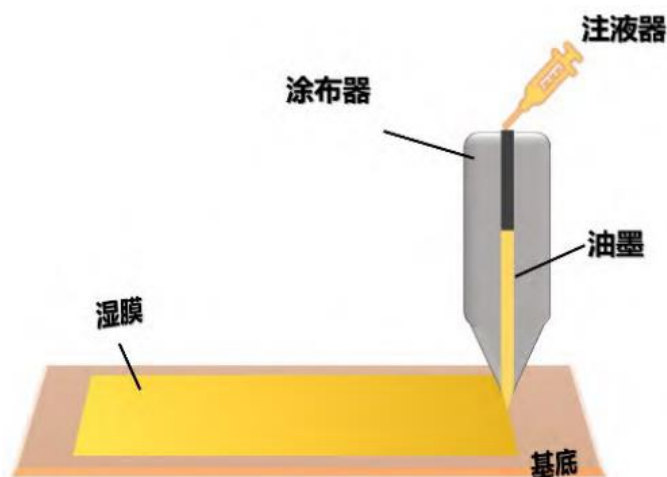
图26 刮涂法制备示意图



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

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

图27 狭缝涂布示意图

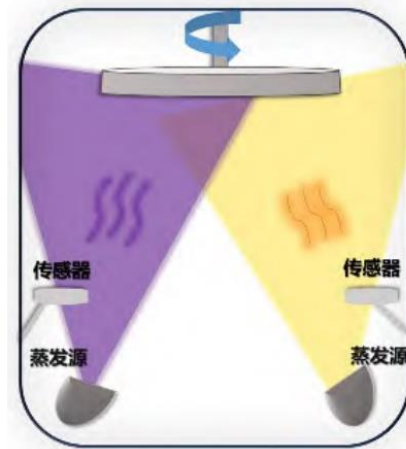


资料来源:《大面积钙钛矿太阳能电池制备方法综述》(梁振群等),东海证券研究所

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

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

图28 化学气相沉积法示意图



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

4.国内钙钛矿产业化进展梳理

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

图29 钙钛矿产业链



资料来源:公开资料整理, 东海证券研究所

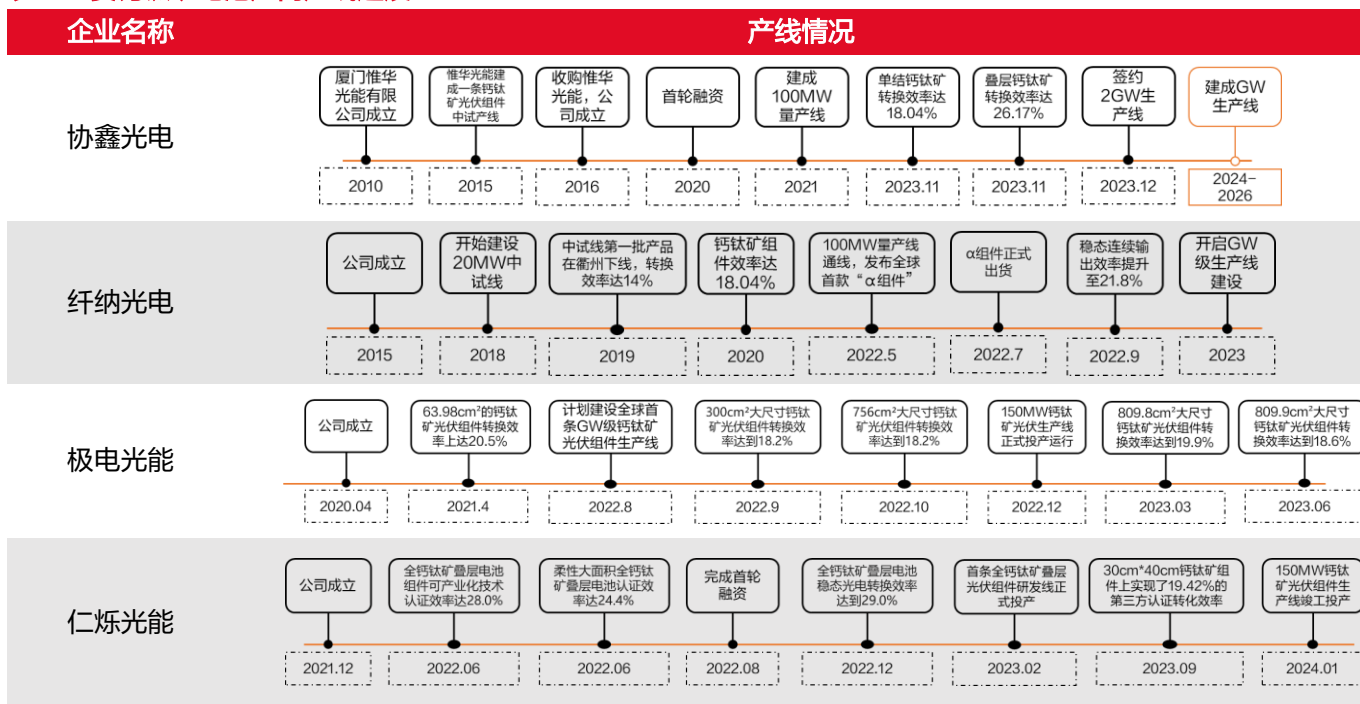
4.1.钙钛矿制造端

国内新兴钙钛矿电池企业纷纷涌现，钙钛矿电池产业化进程持续推进。钙钛矿技术目前尚处于产业化早期，电池结构、材料体系、制备工艺、生产设备仍在持续迭代中，协鑫光电、纤纳光电、极电光能等钙钛矿电池厂商积极验证技术方向，试图解决效率、稳定性、大面积制备的三角难题，加速推进钙钛矿电池量产进程。

效率端，商用尺寸钙钛矿组件效率已突破 18%。协鑫光电于 2023 年 11 月 23 日，推出的 1m×2m 钙钛矿单结组件，其光电转化效率达到 18.04%，又于同年 11 月 30 日宣布 279mm×370mm 钙钛矿叠层组件转换效率达 26.17%。极电光能于同年 11 月 27 日宣布 1.2m×0.6m 商用尺寸钙钛矿组件全面积效率达 18.2%，创下商用尺寸钙钛矿组件效率的行业最高纪录，钙钛矿量产组件效率提升进度超过预期。

产能端，当前以百兆瓦级产线为主，2024 年有望实现 GW 级落地。截止 2023 年 2 月底，协鑫光电和纤纳光电的 100MW 产线实现投产，极电光能的 150MW 产线也已投产，此外，极电光能、纤纳光电等多家厂商已经启动 GW 级产线建设计划，预计 2024-2025 年搭建完成。此外，比亚迪、长城汽车、京东方等龙头跨行业布局钙钛矿，有望加快产业化探索步伐。

表5 主要钙钛矿电池产商产线进展



资料来源：各公司公告、东海证券研究所

钙钛矿企业融资轮次加速，一二级资本纷纷布局。钙钛矿技术正处于从 0 到 1 的产业化初期阶段，电池产线厂商以初创企业为主，协鑫光电、纤纳光电、极电光能等企业深受资本追捧，融资轮次持续推进，此外，多家上市公司也以参股形式进入钙钛矿制造领域，助力钙钛矿产业化突破。

表6 一级市场钙钛矿相关融资情况

公司	轮次	时间	交易金额	交易对手
协鑫光电	天使轮	2020.5.27	-	昆高新集团
	A 轮	2020.7.15	-	凯辉汽车基金、协鑫光电
	A+轮	2020.10.20	-	瑞庭投资
	Pre-B 轮	2021.3.9	过亿人民币	凯辉汽车基金
	B 轮	2022.5.13	5 亿人民币	腾讯投资
	B+轮	2022.12.14	5 亿人民币	Temasek 淡马锡、红杉中国、IDG 资本、川流投资、协鑫科技
纤纳光电	种子轮	2015.8.28	-	德石投资
	天使轮	2017.11.27	-	网新投资
	Pre-A 轮	2018.7.2	-	余杭基金
	A 轮	2019.1.30	-	三峡基金
	A+轮	2019.9.30	-	海邦投资
	B 轮	2020.12.9	-	招银国际资本
	C 轮	2021.1.25	3.6 亿人民币	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
	战略投资	2021.7.19	-	三峡建信
极电光能	D 轮	2022.10.9	4 亿人民币	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、黔灵投资、海邦洋华、长江创新投资
	Pre-A 轮	2021.10.13	2.2 亿人民币	碧桂园创投、九智投资、建银国际、云林基金、稳晟科技、锡创投
众能光电	A 轮	2023.3	数亿元人民币	深创投、九智投资、建银国际、鼎晖百孚、金投资本等
	战略融资	2020.6.30	-	赋戈投资
	战略融资	2021.9.4	-	杭锅股份（西子节能）
	战略融资	2022.12.5	-	华夏恒天
万度光能	A+轮	2022.12.6	-	恒天资本
	天使轮	2016.10.10	-	昌达产业基金
曜能科技	股权融资	2021.8.25	-	宜昌国投集团
	天使轮	2018.3.21	-	启迪之星创投
	A 轮	2021.8.2	数千万人民币	高瓴创投
仁烁光能	B 轮	2022.3.29	-	源码资本、高瓴资本
	战略融资	2022.2.18	-	江苏米格新材料股份有限公司，上海东岚领先能源（集团）有限公司
	Pre-A 轮	2022.8.26	数亿人民币	三行资本、中科创星、苏高创新投创集团、金浦投资、险峰 K2VC、云启资本、中投中财基金、中财鼎晟
	战略融资	2023.02.21	-	前沿投资
无限光能	A 轮	2022.8.26	数亿人民币	中天汇富，中赢基金，亨通集团，中科先进产业基金，国海证券投资有限公司，恒邦资本，瀚叶股份，毅达资本，东方丰海资本，常熟经开控股，建宇集团
	种子轮	2022.2.16	-	清华控股
	天使轮	2022.6.9	数千万人民币	耀途资本、光跃投资、碧桂园创投
光晶能源	Pre-A 轮	2023.1.5	-	盈睿资本
	天使轮	2022.11.21	3 千万人民币	正轩投资、创新工场、鼎祥投资
脉络能源	A 轮	2023.6	1.6 亿人民币	国调战新基金、启明创投、中电投融和资产、中金传誉基金、日初资本、创新工场、鼎祥资本
	战略融资	2022.9.15	-	广州暨南大学科技园管理中心
	天使轮	2022.11.18	数千万人民币	国新思创、凡创资本、高捷资本、国华三新

鹁火光电	Pre-A 轮	2022.10.27	-	上海纳米创投
	A 轮	2023.2	-	涌铎投资
追光科技	天使轮	2021.1	数千万人民币	建智控股、凯得投资、广州凯思
	天使+轮	2023.3	数千万人民币	国科京东方、红杉种子基金
	战略融资	2023.11	数千万人民币	隐山资本
东岚新材	A 轮	2023.4	数亿人民币	三行资本
光因科技	天使轮	2023.6	5 千万人民币	转转集团、梅花创投

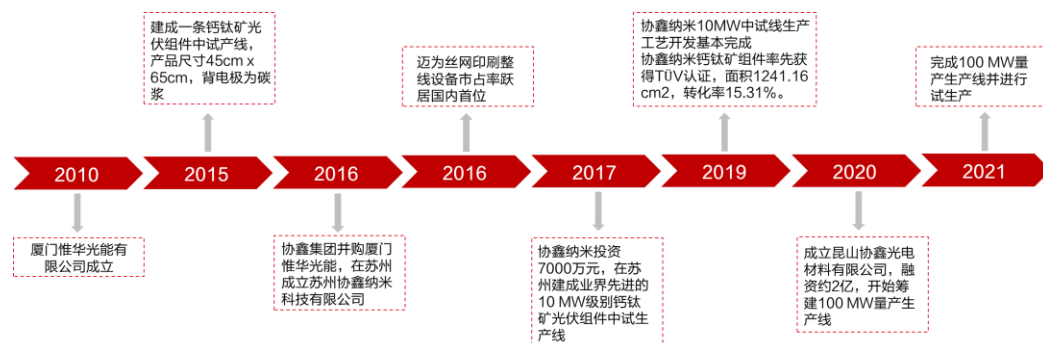
资料来源：各公司公告、各公司官网、东海证券研究所整理

协鑫光电：最大尺寸钙钛矿电池记录创造者

公司成立于 2019 年底，隶属协鑫集团控股有限公司，专注于研发、生产 1m×2m 尺寸的钙钛矿太阳能电池组件，公司的技术团队以瑞士 EPFL 博士范斌为带头人，是国内最早从事钙钛矿组件生产线开发的团队之一。

钙钛矿行业龙头厂商，最大尺寸钙钛矿电池记录创造者。公司投建的全球首条 100MW 量产线已于 2021 年在昆山完成厂房和主要硬件建设，目前已稳定运行近 2 年时间，该产线生产的尺寸为 1×2m 的全球最大尺寸钙钛矿组件，效率已突破 18%，公司为目前最大尺寸钙钛矿电池记录的保持者。母公司苏州协鑫纳米科技有限公司于 2017 年在苏州建成一条 10MW 级 45cm×65cm 钙钛矿光伏组件中试产线，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，可批量生产具有商用化价值的 45cm×65cm 产品，目前该产品的效率已超过 15%，在同类产品中处于高水平。

图30 协鑫光电发展历程



资料来源：公司官网，东海证券研究所

纤纳光电：出货全球首款钙钛矿商业组件

公司成立于 2015 年，总部设在杭州，是全球首家率先将钙钛矿光伏技术成功应用到 100MW 量产线上、实现连续制造，并完成全球首个钙钛矿分布式电站并网运行的机构。

钙钛矿光伏技术和产业化领军企业，发布全球首款钙钛矿商业组件。公司深耕钙钛矿光伏领域，在浙江衢州率先建成国内首个钙钛矿生产基地，全球首条 100MW 钙钛矿规模化产线于 2022 年初投产，同年 5 月发布全球首款钙钛矿商业组件 α 并实现出货售卖。2023 年，公司于内蒙古建设的全球首个商业化运行的兆瓦级钙钛矿地面光伏项目成功并网，占地 40 亩，采用 11200 片纤纳光电自主研发和制造的钙钛矿组件。

图31 内蒙古兆瓦级钙钛矿地面光伏项目


资料来源：公司官网，东海证券研究所

极电光能：商用钙钛矿组件效率保持者

公司起源于长城控股集团，2018 年开始钙钛矿技术研发，2020 年 4 月落地无锡，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。公司率先启动全球首条 GW 级钙钛矿组件生产线建设，预计 2024 年第三季度建成投产。

商用钙钛矿组件效率、最大尺寸钙钛矿组件效率保持者。2022 年 11 月，极电光能 1.2x0.6m²商用尺寸钙钛矿组件全面积效率达到 18.2%，为当前商用尺寸钙钛矿组件效率的行业最高纪录；2023 年 5 月，极电光能研发的 810.1cm²大尺寸钙钛矿组件稳态效率达到 19.5%，打破日本松下保持 3 年之久的世界纪录，再次刷新世界纪录榜单上最大尺寸的钙钛矿组件效率纪录。

图32 极电光能全球首条 GW 级量产线建设


资料来源：极电光能，东海证券研究所

仁烁光能：多项钙钛矿电池效率保持者

公司成立于 2021 年，主营业务为新型钙钛矿光伏组件的研发、生产及销售。公司研发实力雄厚，连续创造多项钙钛矿光伏电池转化效率的世界纪录。产业化进程行业领先，拥有全球首条 10MW 全钙钛矿叠层电池研发线、150MW 钙钛矿太阳能电池量产线。

钙钛矿叠层电池效率屡创新高。2022年12月，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%，再次打破了团队在2022年6月创造的28.0%的世界纪录。2023年9月，公司在30cm*40cm钙钛矿组件上实现了19.42%的第三方认证转化效率，组件制备所有工艺与150MW量产线兼容。

图33 仁烁光能钙钛矿车顶光伏玻璃



资料来源：公司官网，东海证券研究所

4.2.钙钛矿设备端

4.2.1.镀膜设备：多条路线共同发展，RPD 潜力巨大

镀膜设备主要涉及PVD、RPD、ALD三种，而PVD技术又分为真空蒸镀法、溅射法和离子镀法。背电极主要使用蒸镀PVD，目前已发展较为成熟。电子传输层可使用RPD设备，也可先用RPD或ALD设备制作阻隔层，再用溅射PVD做传输层。空穴传输层主流使用溅射PVD或蒸镀PVD。玻璃基板衬底主要使用溅射PVD形成导电层。

表7 主要镀膜方式比较

	PVD	RPD	ALD
沉积原理	物理气相沉积	等离子体沉积	表面饱和式反应
优点	沉积速度快；镀膜具有单一方向	离子能量低，对电池损伤小；光透过率高，电导率高	薄膜厚度较薄；均匀性好；阶梯覆盖率高
缺点	薄膜厚度较厚，精度控制差；厚度均匀性差；阶梯覆盖率差	需要多个靶平行放置，影响产能；靶材利用率低，成本较高	沉积速度较慢
应用	方案成熟、成本更优；等离子轰击造成电池性能下降	电池转化效率更高；量产难度较大，生产效率较低	能满足对薄膜厚度、精度的更高要求

资料来源：势银，东海证券研究所

国内厂商积极布局钙钛矿镀膜设备，并取得相关订单。京山轻机、捷佳伟创、微导纳米等国内企业凭借深厚的技术积累率先布局钙钛矿镀膜设备，已陆续取得订单并实现出货。

表8 钙钛矿镀膜设备厂商布局情况

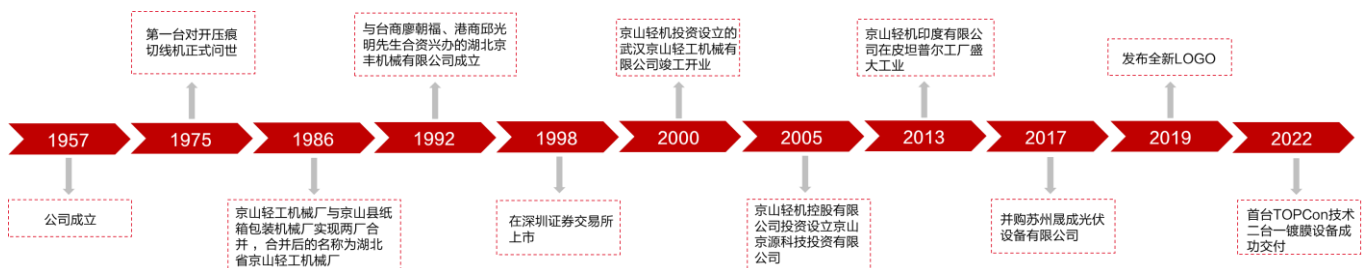
企业名称	钙钛矿相关布局
京山轻机	公司是业内较早完成钙钛矿设备开发且有实际产品销售的企业，在 MW 级钙钛矿电、钙钛矿/叠层电池实验线和钙钛矿组件自动封装线上都可以提供整线设备。
捷佳伟创	公司在获得某央企研究院的钙钛矿低温低损薄膜真空沉积设备订单，以及某国家科学院的反应式等离子镀膜设备订单后，自主研发的钙钛矿共蒸法真空镀膜设备也顺利的再次取得订单，公司成功中标了某全球头部光伏企业的钙钛矿电池蒸镀设备项目。
微导纳米	公司的夸父（KF）系列原子层沉积系统技术，可为钙钛矿/异质结叠层电池等新兴太阳能电池表面钝化提供高质量超薄钝化膜的制备，确保电池光电转换效率的进一步提升。

资料来源：公司公告、东海证券研究所

京山轻机：广泛布局光伏电池全线生产设备，钙钛矿已获整线订单

公司成立于 1957 年，1998 年在深圳证券交易所正式挂牌上市，业务聚焦于光伏和包装业务。公司布局 TOPCon、HJT、钙钛矿三大技术路线，已成为向太阳能光伏组件生产商提供自动化生产线成套装备及整体解决方案的少数厂家之一。

图34 京山轻机发展历程



资料来源：公司公告、东海证券研究所

布局钙钛矿整线设备，已获得整线订单。京山轻机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。目前公司可提供 PVD 镀膜设备、团簇型多腔蒸镀设备、ITO 玻璃清洗机等产品；公司投入大量资金建设了高效钙钛矿太阳能电池实验中心，同时自主搭建了一条完整的钙钛矿实验线，主要用于验证设备与产品的生产工艺。目前公司已具备成熟的钙钛矿实验线整线供应能力，可提供 MW 级钙钛矿生产设备及整体解决方案，并提供 GW 级钙钛矿量产装备输出与技术支持，已成功取得钙钛矿实验线整线订单。

表9 京山轻机钙钛矿及叠层电池组件主要产品

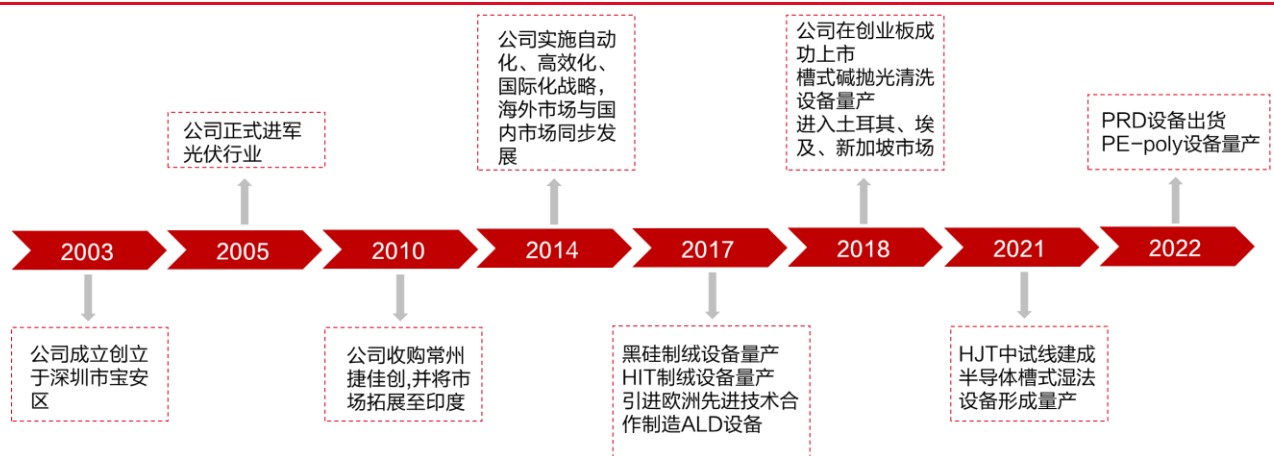
类型	整线设备	规格
GW 级钙钛矿量产装备	玻璃清洗设备、背玻清洗设备，空穴层 PVD 镀膜设备，透明导电层 PVD 镀膜设备，超声波滚压焊接机，丁基胶涂覆机，汇流带贴敷机，封装整线设备等。	满足长（2000~2300mm）×宽（1000~1200mm）的钙钛矿电池生产需求
MW 级钙钛矿高效电池制造整体解决方案	玻璃清洗机、立式 PVD（NiO/ITO/Cu 等）、激光划线（P1/P4）、激光划线（P2/P3）、手套箱配液区、涂布干燥结晶一体机（双工站涂布机 PVK/ETL）、空间原子层沉积（SnO ₂ ）、半自动层压机、PL/EL/IV 测试机等。整线配备 MES 系统智能管理。	满足长（400~1200mm）×宽（300~600mm）的钙钛矿电池生产需求
钙钛矿/叠层电池实验线	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。	满足长（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	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。	满足长（2000~2300mm）×宽（900~1200mm）的组件生产需求

资料来源：公司公告、东海证券研究所整理

捷佳伟创：创新 TOPcon“三合一”制备路线，钙钛矿竞争优势明显

公司 2003 年创立于深圳市宝安区，并于 2010 年与深圳市捷佳创精密设备有限公司成功实现业务整合，产品涵盖原生多晶硅料生产设备、硅片加工设备、晶体硅电池生产设备等。公司在 TOPCon 技术路线具备整线设备交付能力，核心设备 PE-Poly、硼扩散、MAD 等设备已成功交付客户量产运行，其中 PE-Poly 实现了隧穿层、Poly 层、原位掺杂层的“三合一”制备；下属子公司常州捷佳创建立的 HJT 中试线量产转换效率已持续稳定达到 25% 以上。在钙钛矿电池技术路线上，公司设备销售持续放量，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。

图35 捷佳伟创发展历程



资料来源：公司公告、东海证券研究所

各类设备陆续出货，PRD 设备优势明显。公司具备钙钛矿及钙钛矿叠层 MW 级整线装备的研发和供应能力，已向十多家光伏头部企业和行业新兴企业及研究机构提供钙钛矿装备

及服务。2021 年公司 RPD 设备中标首个钙钛矿中试设备采购订单，2022 年 7 月，首台套量产型钙钛矿电池核心装备“立式反应式等离子体镀膜设备”（RPD）出货，并再次中标一家领先公司的钙钛矿电池量产线镀膜设备订单。2023 年，公司研发的五合一团簇式钙钛矿叠层真空镀膜设备成功下线，并顺利发货给客户；10 月初，公司的钙钛矿产业化项目在常州奠基，将新增 150 亩用地，提高公司在钙钛矿以及钙钛矿叠层的研发制造能力和竞争力。

图36 捷佳伟创大面积钙钛矿薄膜立式量产设备



资料来源：公司官网，东海证券研究所

微导纳米：业内首条 GW 级 TOPcon 整线工艺已验收，钙钛矿 ALD 技术前景光明

公司成立于 2015 年，是一家面向全球的半导体、泛半导体高端微纳装备制造制造商。公司形成了以原子层沉积（ALD）技术为核心，CVD 等多种真空薄膜技术梯次发展的产品体系。根据公开市场数据，公司 ALD 产品已连续多年在营收规模、订单总量和市场占有率方面位居国内同类企业第一，由公司开发的行业内首条 GW 级 TOPCon 工艺整线已经获得客户的验收。

图37 微导纳米发展历程





资料来源：公司官网，东海证券研究所

研发多个系统应用于钙钛矿生产，积极改善 ALD 技术问题。公司夸父（KF）系列原子层沉积系统、后羿（HY）系列 ALD/PEALD/PECVD 薄膜沉积系统均可用于钙钛矿生产，其中夸父系列已实现产业化应用。公司率先将 ALD 技术规模化应用于国内光伏电池生产，目前已成为行业内提供高效电池技术与设备的领军者之一，与国内头部光伏厂商形成了长期合作伙伴关系。目前 ALD 在钙钛矿中应用的主要问题是产能节拍慢、成本高，随着未来几年

钙钛矿电池商业化落地与 ALD 设备工艺改进, ALD 设备在钙钛矿电池产线中或将取得重要地位。

表10 微导纳米钙钛矿主要产品

产品系列	产品图片	产品特征
夸父 (KF) 系列原子层沉积系统		<ol style="list-style-type: none"> 1. 适用于 PERC、PERL、PERT、TOPCon、IBC、TBC、HJT、Perovskite、Tandem-Cell 等高效电池技术的应用; 2. 可制备薄膜包括 Al₂O₃、SiO₂、TiO₂、ZnO 等; 3. 单腔最大装片量可达 2400 片/批次, 兼容 M10-M12 硅片尺寸, 升级切换简单; 4. 精确实现原子层级薄膜厚度控制 (1-10nm, 可调), 具备优异的薄膜厚度均匀性 (片内 3%, 片间 3%, 批间 3%); 5. 独立运行反应腔体, 确保最大化设备运行率 (>99%); 6. 提供定制化复杂纳米叠层工艺以及 CVD 兼容功能。
后羿 (HY) 系列 ALD/PEALD/PECVD 链式薄膜沉积系统		<ol style="list-style-type: none"> 1. 专用于沉积异质结 (HJT) 和钙钛矿等高效电池的非晶/微晶、掺杂层、阻水阻氧、致密保护层等薄膜材料; 2. 模块化可灵活选择的腔体和工艺; 3. 多单元气体分布系统; 4. 快速均匀热场; 5. 等离子体电场大面积高均匀性; 6. 各类硅片尺寸兼容性强。

资料来源: 公司公告、东海证券研究所整理

4.2.2. 涂布设备: 国产化进程加速, 德沪涂膜遥遥领先

涂布设备主要用于制作钙钛矿吸光层, 国产化替代进程持续加速。目前钙钛矿层制备工艺主要采用以狭缝涂布机为代表的精密涂布设备, 过去美国 nTact、日本东丽工程和韩国三兴机械等国外涂布设备厂商技术优势明显, 但近年来德沪涂膜、大正微纳等国内企业不断实现技术突破, 打破了国外垄断, 正在持续加快国产化替代进程。

表11 钙钛矿涂布设备厂商布局情况

企业名称	发展现状
德沪涂膜	随着 2023 年 8 月两台新涂布设备的交付, 公司的大尺寸高精密涂膜设备在我国已交付钙钛矿量产线中的市占率由原有 75% 上升至 85.7%, 助力形成国产狭缝涂膜设备完全替代进口的局面。2021 年, 公司 1m*2m 量产狭缝涂布设备交付, 为全球第一条 100MW 钙钛矿核心设备; 2023 年中期, 公司再度斩获 100MWs 钙钛矿量产线大尺寸高精密涂膜设备订单。
大正微纳	公司实现了连续四层纳米级别薄膜的液相涂布制备, 稳定实现了钙钛矿薄膜电池的制备, 打破了薄膜电池严重依赖欧美高真空物理/化学沉积设备的技术壁垒。经过目前高精密狭缝涂布机的研发和销售, 实现核心设备自主生产。
众能光电	对外销售刮涂/涂布一体机、磁控溅射、热蒸发镀膜、ALD 和激光刻蚀机等工艺单机以及光伏组件整线近 100 台套。

资料来源: 公司公告、东海证券研究所

德沪涂膜：钙钛矿涂层设备市占率超 80%，加速推进零部件国产化

公司于 2016 年在上海成立，其精密涂膜核心装备包括涂膜、干燥、烘烤及整套解决方案。2020 年，公司与协鑫合作了全球首个 100MWs 生产线（1mx2m）；在首台套狭缝涂布设备成功交付协鑫的四个月后，顺利通过了最终验收，并且已经连续两年无故障稳定运行。700MWs 平米级中试线的核心钙钛矿涂层设备市占率逐年上升，目前已达 80%以上，而且所有交付的大尺寸设备在规定时间内验收率达 100%。

成立钙钛矿研究院，多平台共同推进国产化进程。公司投资近亿元成立钙钛矿研究院，已建有 300mm*300mm 产品放大产线平台、平米级大尺寸平台及高通量晶硅-钙钛矿叠层平台，与客户一同面对行业技术挑战。为了达到高性价比的竞争优势，实现降本增效，公司将充分利用中国全球最佳供应链，加速推进零部件的国产化，力争在 3-5 年内，关键零部件国产率从现在的 70%上升至 95%以上，真正实现高端装备供应链国产化。

图38 德沪涂膜钙钛矿产业方案



资料来源：公司公告，东海证券研究所

4.2.3.激光设备：参与多个生产流程，产业化进程较快

激光设备产业化进程较快，国内部分厂商已实现量产出货。在钙钛矿产线中，激光设备主要用于激光划线，刻划钙钛矿吸收层、钙钛矿层及电极，去除 TCO 层以及进行清边绝缘，整体价值量约占 10-20%，激光设备产业化进程较快。

表12 钙钛矿激光设备厂商布局情况

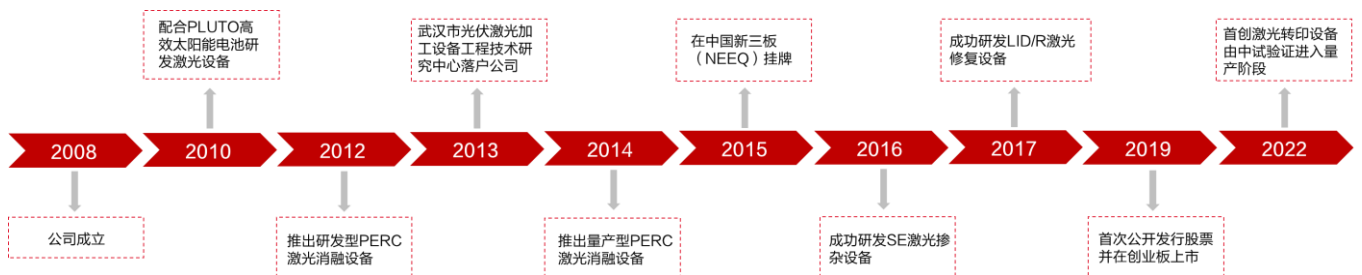
企业名称	发展现状
帝尔激光	公司的激光设备在钙钛矿太阳能电池 TCO 层、氧化物层、电极层的生产制程中均有应用，目前已有小批量订单并已完成交付。
迈为股份	2021 年为客户定制的单结大面积钙钛矿电池激光设备已交付。
德龙激光	公司薄膜太阳能电池激光综合加工系统 ALS03 拥有集成度高，单台设备即可完成钙钛矿太阳能电池的 P1/P2/P3/P4 工序、划线宽度和深度可控、高精度视觉定位，死区宽度可控等优势。
杰普特	公司于 2022 年交付客户并投入使用太阳能薄膜整段生产设备，为客户在国内率先实现百兆瓦级规模化量产提供了助力，并于 2022 年下半年开始一直与头部客户的新工艺开发进行商务沟通，同时不断开拓新客户。
大族激光	公司自主研发了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一直保持合作关系。

资料来源：公司公告、东海证券研究所

帝尔激光：国内首个光伏电池激光技术企业，钙钛矿量产订单已交付

公司于 2008 年成立于武汉光谷，公司是国内首次将激光技术导入光伏太阳能电池路线的国家高新技术企业。目前，公司已成功将激光加工技术应用到 PERC、TOPcon、IBC、HJT、钙钛矿等高效太阳能电池及组件技术，是行业内少数能够提供高效太阳能电池激光加工综合解决方案的企业。

图39 帝尔激光发展历程



资料来源：公司公告、东海证券研究所

激光设备可用于钙钛矿电池每一层，已实现量产订单交付。公司积极研发钙钛矿电池的相关设备，钙钛矿的膜层往上依次为 TCO 层、钙钛矿层、电极层，公司激光设备在钙钛矿电池每一层都有相应的应用，同时公司还考虑在边绝缘上的应用。公司 2022 年完成了钙钛矿电池量产订单的交付，2023 年存在多种钙钛矿工艺设备订单的交付。

图40 帝尔激光钙钛矿激光刻膜设备



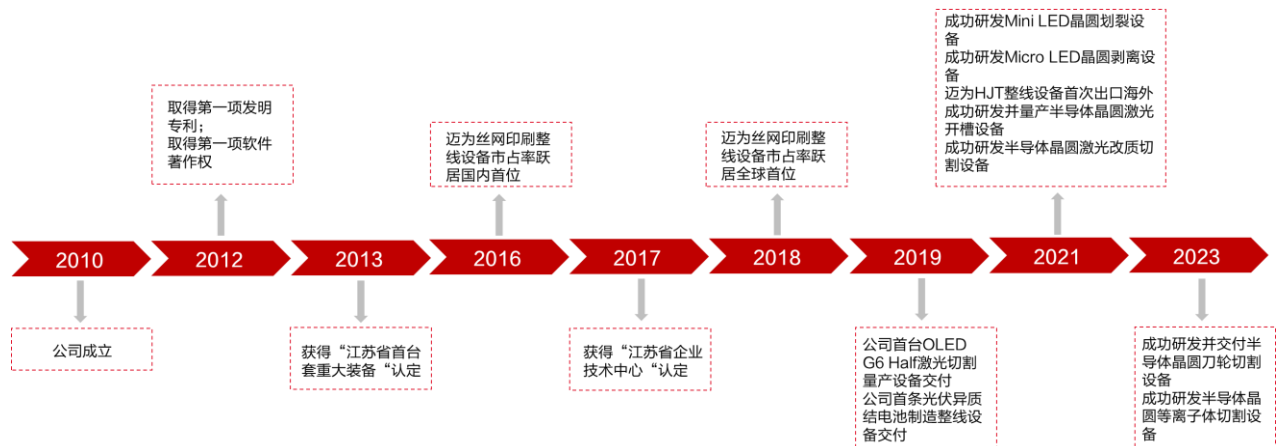
资料来源：公司公告，东海证券研究所

迈为股份：太阳能电池丝网印刷设备龙头企业，钙钛矿研发进展顺利

公司成立于 2010 年，所生产的太阳能电池丝网印刷生产线成套设备打破了丝网印刷设备领域进口垄断的格局，改变了我国太阳能电池丝网印刷设备主要依赖进口的局面；同时也实现了设备的海外销售，远销新加坡、马来西亚、泰国、越南等海外市场，实现了智能制造装备少有的对外出口。目前，公司的太阳能电池丝网印刷设备的销售规模和市场份额占据市场龙头地位。

钙钛矿尚处于研发阶段，实验室叠层研发线已投入运营。当前公司钙钛矿设备尚处于研发阶段，公司研发团队分为 PECVD 真空设备研发、PVD 真空设备研发、丝网印刷设备研发、激光设备研发和半导体薄膜工艺技术研发等，已承担多项国家级、省级科技项目。公司坚定看好异质结与钙钛矿叠层，预计在 2027 年实现产业化。2023 年底，公司实验室有一条片级的异质结与钙钛矿叠层研发线投入运营。

图41 迈为股份发展历程



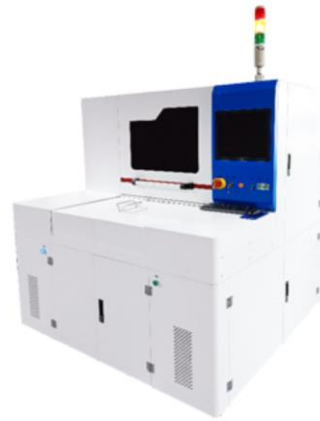
资料来源：公司公告、东海证券研究所

德龙激光：专注激光加工设备，钙钛矿整段设备已实现交付

公司成立于 2005 年，主营业务为高端工业应用精密激光加工设备及其核心器件激光器的研发、生产和销售。2022 年，公司新设立新能源事业部，布局锂电、光伏等新能源应用领域，主要包括：1) 钙钛矿薄膜太阳能电池生产设备；2) 印刷网版激光制版设备；3) 锂离子、氢燃料动力电池相关智能化装备；4) 电力系统储能、基站储能和家庭储能电池相关智能化装备。

公司可提供钙钛矿整段设备，首套设备已交付。公司已推出钙钛矿薄膜太阳能电池生产整段设备，包括 P0 层激光打标设备，P1、P2、P3 激光划线设备，P4 激光清边设备及其中一系列自动化设备。2022 年，公司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。

图42 德龙激光钙钛矿薄膜太阳能激光综合加工设备



资料来源：公司公告，东海证券研究所

大族激光：深耕激光设备，钙钛矿设备已实现量产销售

公司成立于 1996 年，是专业从事智能制造装备及其关键器件的研发、生产和销售的企业，具备从基础器件、整机设备到工艺解决方案的垂直一体化优势，是全球领先的智能制造装备整体解决方案服务商。光伏行业主要产品在光伏电池及组件环节，包括 Topcon 电池生产主设备：激光硼掺杂设备、PECVD（等离子增强气相沉积设备）、LPCVD（低压化学气相沉积设备）、扩散炉、氧化炉、退火炉，以及组件段的无损划片机、划焊一体机等。

钙钛矿激光设备已量产销售，大尺寸设备实现交付。公司在钙钛矿领域凭借多年在薄膜电池领域的技术积累进行布局。2022 年，公司自主研发了钙钛矿激光刻划设备，并已实现量产销售，大尺寸整线激光刻划设备已在钙钛矿头部企业交付，与协鑫光电等行业头部客户一直保持合作关系。

图43 大族激光划焊一体机

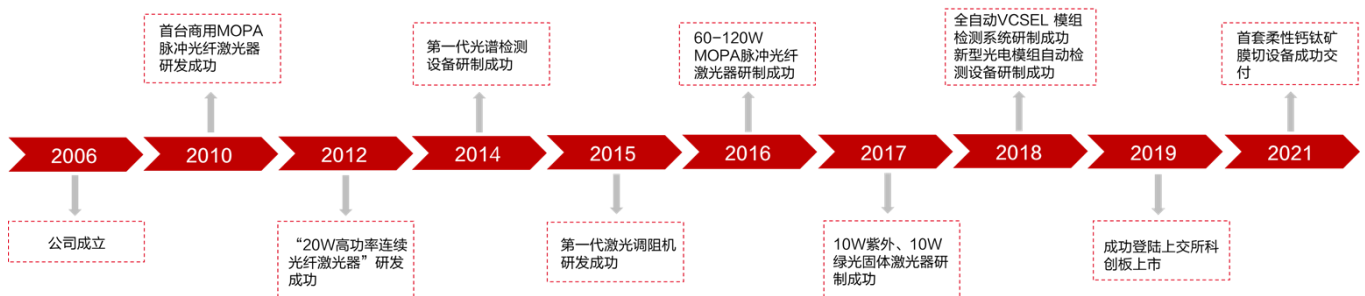


资料来源：公司公告，东海证券研究所

杰普特：出货全球首台柔性钙钛矿模切设备，加工效率大幅提升

公司成立于 2006 年，是一家集研发、生产和销售激光器、激光/光学智能装备和光纤器件于一体的国家级高新技术企业。公司于 2021 年开始布局锂电和光伏领域，在晶硅技术路线上为客户提供杰普特自主研发的国产激光器，进一步降低生产成本，是行业首批实现 TOPCon SE 激光掺杂光源批量出货的厂商。

图44 杰普特发展历程



资料来源：公司公告、东海证券研究所

定制全球首台柔性钙钛矿模切设备，二代设备效率提升八倍。公司可为客户提供用于光伏钙钛矿领域的激光模切设备，该款设备用于钙钛矿生产中 P1 至 P4 的激光模切以及激光清边工艺。2021 年为江苏大正微纳科技定制的全球首套柔性钙钛矿膜切设备，通过验收并正式投入生产使用。2022 年公司研发第二代钙钛矿模切设备，增加多光束设计，加工效率较公司第一代产品提升 8 倍，目前已向多家客户发出样机试用。

图45 杰普特大尺寸钙钛矿 P1/P2/P3 整套激光划线设备



资料来源：公司公告，东海证券研究所

4.3.钙钛矿辅材端

4.3.1.TCO 玻璃：生产门槛相对较高，国内厂商进展迅猛

TCO 玻璃国外技术相对成熟，国内企业已实现供货。TCO 玻璃生产门槛较高，镀膜设备和工艺控制均对其连续生产和良率有重要影响。TCO 玻璃以日本板硝子、旭硝子为领军企业，国内金晶科技率先向头部钙钛矿企业供货，技术已经得到认证，亚玛顿、旗滨集团、耀皮玻璃等厂商也都进行了相应的技术储备。

表13 TCO 玻璃厂商布局情况

企业名称	钙钛矿相关布局
金晶科技	2021 年，公司完成了 TCO 镀膜玻璃基片的研发，在高透过率基片基础上相继开发成功 3.2mm 和 2.65mm TCO 镀膜玻璃。
亚玛顿	2021 年，公司与纤纳光电签署合作协议，未来双方将在钙钛矿太阳能电池玻璃定制、BIPV 组件、TCO 玻璃等多个方面展开多维度合作。
耀皮玻璃	2023 年，公司浮法玻璃板块业务成功调试可用于钙钛矿的 TCO 玻璃，大连项目 2023 年 5 月开始满负载运行，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。
旗滨集团	具备规模化生产大面积 FTO 玻璃的能力，生产的 TCO 玻璃已分别通过国家科学技术成果鉴定和新产品新技术鉴定。

资料来源：公司公告、东海证券研究所

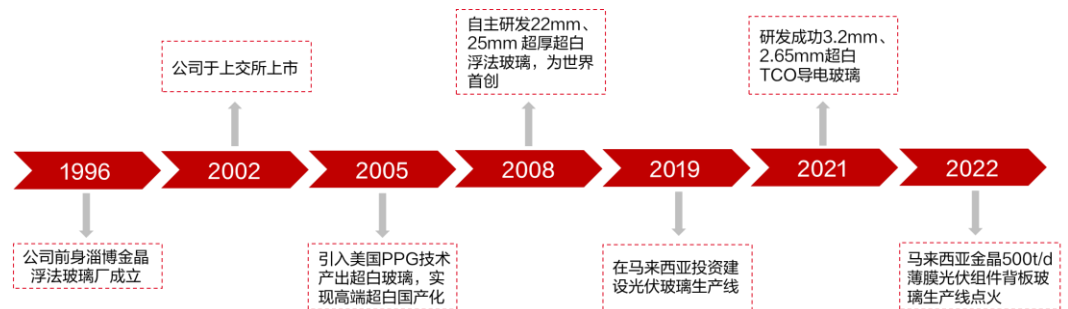
金晶科技：TCO 玻璃龙头企业，建设投产国内首条 TCO 玻璃生产线

金晶科技成立于 1999 年 12 月，公司光伏玻璃产业实体分别位于山东、宁夏、马来西亚区域，主要产品为光伏压延玻璃、光伏背板玻璃、TCO 导电膜玻璃等，具备两种不同的工艺路线，为两种不同类型的光伏组件进行产业配套。

国内首条 TCO 玻璃生产线已投产，与多家企业建立商务关系。2022 年 5 月，公司国内首条 TCO 导电玻璃生产线投产；2023 年 9 月公司二线 600T/D 玻璃生产线升级改造为 TCO 玻璃产线项目成功点火，项目投产后，主要产品为 TCO 玻璃；公司马来西亚薄膜光伏

组件背板玻璃产线已于 2022 年 3 月下线产品，并实现向客户稳定供货；2022 年，国内具备中试线能力的碲化镉、钙钛矿客户均已确认金晶 TCO 产品性能，并建立了商务关系。

图46 金晶科技发展历程



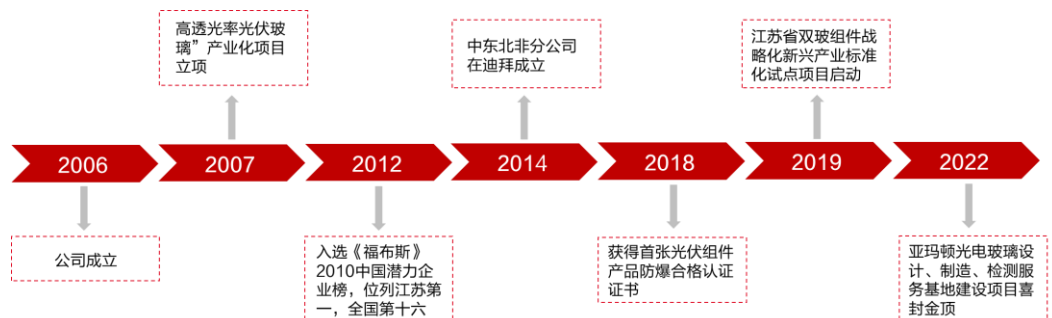
资料来源：公司官网，东海证券研究所

亚玛顿：超薄光伏玻璃领军者，TCO 玻璃已实现批量供货

公司成立于 2006 年，2011 年在深交所中小板上市，为国内首家研发和生产应用纳米材料在大面积光伏玻璃上镀制减反射膜的企业。公司率先利用物理钢化技术规模化生产 $\leq 2.0\text{mm}$ 超薄物理钢化玻璃、超薄双玻组件，后又率先开发出更加轻量化、薄型化的 1.6mm 的光伏玻璃，确保了公司核心技术和产品处于国内领先水平。

早期布局 TCO 行业，已实现批量供货。公司较早研究 TCO 玻璃相关技术，在该领域积累了技术经验和产能储备，2022 年公司根据客户需求小批量送样了 ITO 玻璃，并且在成功导入后批量供货。此外，公司研发部门专门成立了钙钛矿研发小组，旨在加强基于公司独创气浮式钢化技术的 ITO 导电玻璃可钢化（高平整度）的技术研发，以满足未来大尺寸钙钛矿产品高强度、低厚度盖板玻璃的市场需求。

图47 亚玛顿发展历程



资料来源：公司官网，东海证券研究所

4.3.2. 靶材：功能薄膜核心原料，国产化价值显现

钙钛矿电池组件需使用四层靶材，成本占比约为 35%。靶材是在溅射过程中被高速金属等离子体流轰击的目标材料，是制备功能薄膜的核心原材料。靶材的纯度为 99.95% 以上，更换不同靶材可得到不同的膜系，从而实现导电或阻挡等功能。钙钛矿电池中，TCO 导电玻璃、金属背电极、空穴传输层、电子传输层的制作均会用到各类靶材。按照目前头部企业中试线情况测算，钙钛矿单瓦总成本约 2 元/W，其中靶材占比 35%，价值量排序为 TCO 背

电极>TCO 玻璃导电层>电子传输层材料~空穴传输层材料。全球靶材的研制和生产长期集中于霍尼韦尔（美国）、日矿金属（日本）、东曹（日本）等公司，形成寡头垄断的市场格局，国内厂商积极推动靶材国产化进程，江丰电子、隆化科技、有研新材、阿石创等公司已取得重大进展。

表14 靶材在钙钛矿不同功能层制备中应用

钙钛矿功能层	可选工艺	相应靶材	类型
钙钛矿层	真空蒸镀	CsI、PbCl ₂ 、FAL等	蒸发材料
纯化层	RPD&真空蒸镀	MgF _x 、LiF等	溅射靶材&蒸发材料
电子传输层	RPD&真空蒸镀	SnO ₂ 、TiO ₂ 等	溅射靶材&蒸发材料
空穴传输层	RPD&真空蒸镀&磁控溅射	CuO _x 、NiO、Ga ₂ O ₃ 等	溅射靶材&蒸发材料
TCO 背电极	磁控溅射	ITO、FTO、AZO等	溅射靶材

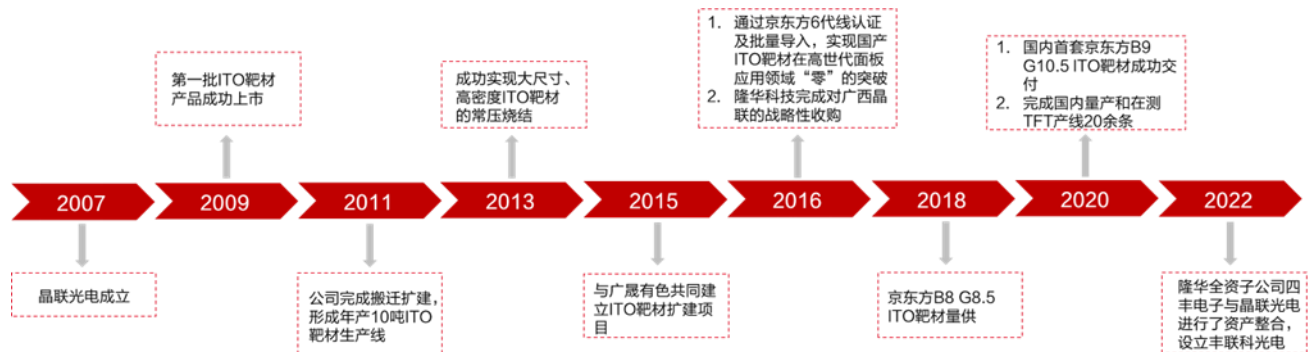
资料来源：协鑫科技、方昇光电、东海证券研究所整理

隆华科技：助力国内高端靶材市场，光伏靶材已进入供货阶段

公司成立于 1995 年，公司研发生产的高纯钼及钼合金靶材、银合金靶材、ITO 靶材等科技产品，填补了中国在相关领域的技术空白，率先打破长期以来高端靶材依赖进口的局面，满足了国内半导体显示产业不断扩大的市场需求，并成功进入众多国际一流半导体显示面板企业的产品供应链，成为细分行业的技术引领者和标准制定者。

加大光伏领域研发力度，光伏靶材已实现验证供货。全资子公司丰联科光电拥有丰富的靶材产品系列组合，特殊比例光伏靶材已通过隆基等客户的认证，并同时进行着多种新型靶材的开发工作。公司靶材产品可应用于钙钛矿电池的 TCO 导电玻璃、空穴传输层和电子传输层，出货逐步实现放量。

图48 丰联科光电（隆华科技子公司）发展历程



资料来源：公司官网、东海证券研究所

阿石创：深耕 PVD 镀膜材料，战略布局 ITO 靶材业务

公司成立于 2002 年，总部位于福建福州。公司专业从事 PVD 镀膜材料的研发、生产与销售，自主研发 200 多款高端镀膜材料，产品覆盖光学、光伏、半导体、平板显示等多个领域，累计服务超过 400 家客户，涵盖同京东方、深天马、福耀玻璃、信义玻璃等知名企业，已成长为国内 PVD 镀膜材料行业设备齐全、技术先进、产品多元化的龙头厂商之一。

公司在钙钛矿领域具备多款成熟产品。在 HJT 领域，公司积极推进 ITO 靶材的扩产和验证，已成功打通火法工艺，将钢与氧气直接反应得到氧化钢颗粒，相较湿法工艺可降本 200 元/公斤以上。在钙钛矿领域，公司基础的介孔层、致密层用靶材环节已具备成熟产品。

图49 阿石创发展历程



资料来源：公司公告、东海证券研究所

5. 市场空间测算

5.1. 钙钛矿设备端空间测算

钙钛矿技术快速发展，设备端最先迎来放量。预计 2030 年全球钙钛矿设备新增市场空间将达 322 亿元，2023-2030 年 CAGR 约为 171%，其中，镀膜设备/激光设备/涂布设备/封装设备市场空间分别为 77/39/23/184 亿元，关键假设如下：

1) 假设 2023-2025 年全球新增光伏装机规模分别为 370/432/512GW，2025-2030 年全球新增光伏装机 CAGR 为 12.5%，容配比为 1.25。

2) 中性假设 2023-2030 年钙钛矿渗透率由 0.1% 提升至 13%。

3) 根据科民电子，百兆瓦级钙钛矿产线设备投资额约 1.2 亿元，需镀膜设备 3 台，包括 PVD 设备 2 台（1000 万元/台）和 ALD 设备 1 台（2000 万元/台）；需激光设备 4 台，总价值量约 1000-1500 万元；钙钛矿层及钝化层需涂布设备 2 台，合计约 2000 万元；需封装设备 1 台，单台价值约 1200 万，预计大规模量产产 GW 级产线设备投资额将降至 5 亿元左右。

表15 2023-2030 年钙钛矿设备空间测算

	2022	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
全球光伏新增装机（GW）	230	370	432	512	574	645	727	816	923
YOY		61%	17%	19%	12%	12%	13%	12%	13%
容配比	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
光伏组件需求（GW）	288	463	540	641	718	806	908	1019	1154
产能利用率	42%	45%	48%	51%	54%	58%	63%	68%	70%
组件产能（GW）	683	1034	1125	1256	1329	1390	1442	1499	1649
钙钛矿电池渗透率	0.1%	0.1%	0.5%	1.5%	3.0%	5.0%	7.0%	10.0%	13.0%
钙钛矿电池产能（GW）	0.4	1.0	5.6	18.8	39.9	69.5	100.9	149.9	214.3
单 GW 设备投资额（亿元）	13.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0
钙钛矿设备新增市场空间（亿元）	4.8	7.6	50.9	132.1	189.4	236.9	219.9	294.0	322.2
镀膜设备（亿元）	1.2	1.8	12.2	31.7	45.4	56.9	52.8	70.6	77.3
激光设备（亿元）	0.6	0.9	6.1	15.9	22.7	28.4	26.4	35.3	38.7
涂布设备（亿元）	0.3	0.5	3.6	9.2	13.3	16.6	15.4	20.6	22.6
封装设备（亿元）	2.7	4.3	29.0	75.3	107.9	135.1	125.3	167.6	183.6

资料来源：CPIA，协鑫光电，科民电子，东海证券研究所预测

5.2. 钙钛矿材料端空间测算

钙钛矿组件需求增长，有望带动钙钛矿材料市场规模快速扩张。根据协鑫光电测算，钙钛矿产能达到 100MW 时，生产成本为 0.94 元/W，如果组件效率达到 17%，电池规格达到 2.4 m²，组件成本将降至 0.7-0.75 元/W。若 2030 年钙钛矿组件产量达 97GW，钙钛矿层市场空间将达 27 亿元，玻璃市场空间将达 284 亿元，其中，TCO 玻璃约为 196 亿元，背板玻璃约为 88 亿元，封装材料市场空间将达 54 亿元，其中，POE 胶膜约为 47 亿元，丁基胶约为 7 亿元，靶材市场空间将达 236 亿元，铝边框市场空间将达 41 亿元，接线盒市场空间将达 34 亿元。

表16 2023-2030 年钙钛矿材料空间测算

	2022	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
钙钛矿组件产量 (GW)	0.1	0.3	1.4	5.7	14.0	24.3	40.4	60.0	96.5
钙钛矿组件成本 (亿元/GW)	10.0	9.4	9.0	8.5	8.0	7.5	7.0	7.0	7.0
钙钛矿材料市场空间 (亿元)	1.0	2.4	12.7	48.0	111.7	182.4	282.5	419.8	675.2
钙钛矿层市场空间 (亿元)	0.0	0.1	0.5	1.9	4.5	7.3	11.3	16.8	27.0
玻璃市场空间 (亿元)	0.4	1.0	5.3	20.2	46.9	76.6	118.7	176.3	283.6
TCO 玻璃 (亿元)	0.3	0.7	3.7	13.9	32.4	52.9	81.9	121.7	195.8
背板玻璃 (亿元)	0.1	0.3	1.6	6.2	14.5	23.7	36.7	54.6	87.8
封装材料市场空间 (亿元)	0.1	0.2	1.0	3.8	8.9	14.6	22.6	33.6	54.0
POE 胶膜 (亿元)	0.1	0.2	0.9	3.4	7.8	12.8	19.8	29.4	47.3
丁基胶 (亿元)	0.0	0.0	0.1	0.5	1.1	1.8	2.8	4.2	6.8
靶材市场空间 (亿元)	0.4	0.8	4.4	16.8	39.1	63.9	98.9	146.9	236.3
铝边框市场空间 (亿元)	0.1	0.1	0.8	2.9	6.7	10.9	17.0	25.2	40.5
接线盒市场空间 (亿元)	0.1	0.1	0.6	2.4	5.6	9.1	14.1	21.0	33.8

资料来源：CPIA，协鑫光电，东海证券研究所预测

6.投资建议

钙钛矿技术理论转换效率高、理论成本低,应用场景广,有望成为下一代光伏电池技术。转换效率方面,钙钛矿材料带隙根据组分的不同可在较大的范围内连续调节,单结钙钛矿电池效率上限超 30%,双结叠层效率上限更有望接近 45%;经济性方面,进入量产的钙钛矿组件成本预计为 0.5-0.6 元/W,仅为晶硅组件极限成本的 50%;应用场景方面,钙钛矿材料具有轻薄美观、颜色可调等优点,有望成为 BIPV、CIPV 等场景的首选。然而,钙钛矿技术在稳定性和大面积制备方面仍存在缺陷,各厂商从电池结构、材料体系、制备工艺、生产设备多维度出发探索解决方案,待难点解决有望迎来钙钛矿电池快速放量。

钙钛矿技术尚处于产业化初期阶段,多家头部企业已启动 GW 级产线招标。商用尺寸钙钛矿组件效率已突破 18%,产线以百兆瓦级为主,协鑫光电、纤纳光电和极电光能等 3 条百兆瓦以上钙钛矿产线已实现投产,极电光能、纤纳光电等多家厂商也已启动 GW 级产线建设计划,预计 2024-2025 年搭建完成,产业化探索步伐持续加速。

各企业制备工艺多样化,未来市场空间广阔。从业绩放量顺序考虑,创新技术发展初期设备厂商最先收益,激光设备技术路径相对明确,涂布及镀膜设备技术路径未定,建议关注捷佳伟创、迈为股份、京山轻机、金辰股份、曼恩斯特、大族激光、帝尔激光、德龙激光、杰普特、德沪涂膜。其次关键辅材确定性较高,TCO 玻璃端建议关注金晶科技、亚玛顿、耀皮玻璃,封装材料端建议关注福斯特、海优新材,靶材端建议关注隆华科技、阿石创。而从弹性角度来看电池厂商具备优势,重点标的包括钙钛矿创业公司协鑫光电、纤纳光电、仁烁光能、极电光能等。

表17 钙钛矿重点公司估值 (截至 2024 年 02 月 23 日)

	证券代码	名称	总市值 (亿元)	股价(元) /股	归母净利润(亿元)			PE		
					2023E	2024E	2025E	2023E	2024E	2025E
钙钛矿设备	000821.SZ	京山轻机	83	13	4.4	5.9	7.1	19	14	12
	300724.SZ	捷佳伟创	216	62	16.8	25.8	34.6	13	8	6
	688147.SH	微导纳米	164	36	2.5	5.1	7.4	66	32	22
	300776.SZ	帝尔激光	124	45	5.1	8.2	10.7	24	15	12
	300751.SZ	迈为股份	334	120	11.7	20.2	29.2	29	17	11
	688170.SH	德龙激光	29	28	0.4	0.9	1.4	80	31	20
	002008.SZ	大族激光	196	19	9.7	14.3	18.0	20	14	11
TCO 玻璃	688378.SH	杰普特	47	32		2.4	3.6	31	20	13
	600586.SH	金晶科技	85	6	6.0	7.7	9.8	14	11	9
封装材料	002623.SZ	亚玛顿	44	22	1.2	1.9	2.7	37	23	16
	603806.SH	福斯特	504	27	21.6	29.7	37.1	23	17	14
靶材	688680.SH	海优新材	42	50	0.1	3.2	4.5	301	13	9
	300263.SZ	隆华科技	54	6	2.7	3.7	4.8	20	15	11
	300706.SZ	阿石创	29	19	0.4	0.8	1.1	82	39	26

资料来源: Wind, 东海证券研究所

7.风险提示

1.钙钛矿技术进展不及预期。钙钛矿技术尚处于产业化早期,其电池结构、材料体系、制备工艺、生产设备等方面存在较大不确定性,难度可能超出产业预期,导致商业化落地时间长于市场预期。

2.设备或辅材国产化不及预期。钙钛矿电池生产下降部分依赖于设备及辅材的国产化，若设备及辅材国产化不及预期可能影响钙钛矿电池的市场竞争力。

3.下游需求景气度变化。钙钛矿作为新兴的光伏技术，其发展与光伏下游需求息息相关，未来光伏行业竞争格局恶化等因素可能带来行业景气下行风险。

一、评级说明

	评级	说明
市场指数评级	看多	未来 6 个月内沪深 300 指数上升幅度达到或超过 20%
	看平	未来 6 个月内沪深 300 指数波动幅度在-20%—20%之间
	看空	未来 6 个月内沪深 300 指数下跌幅度达到或超过 20%
行业指数评级	超配	未来 6 个月内行业指数相对强于沪深 300 指数达到或超过 10%
	标配	未来 6 个月内行业指数相对沪深 300 指数在-10%—10%之间
	低配	未来 6 个月内行业指数相对弱于沪深 300 指数达到或超过 10%
公司股票评级	买入	未来 6 个月内股价相对强于沪深 300 指数达到或超过 15%
	增持	未来 6 个月内股价相对强于沪深 300 指数在 5%—15%之间
	中性	未来 6 个月内股价相对沪深 300 指数在-5%—5%之间
	减持	未来 6 个月内股价相对弱于沪深 300 指数 5%—15%之间
	卖出	未来 6 个月内股价相对弱于沪深 300 指数达到或超过 15%

二、分析师声明:

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师,具备专业胜任能力,保证以专业严谨的研究方法和分析逻辑,采用合法合规的数据信息,审慎提出研究结论,独立、客观地出具本报告。

本报告中准确反映了署名分析师的个人研究观点和结论,不受任何第三方的授意或影响,其薪酬的任何组成部分无论是在过去、现在及将来,均与其在本报告中所表述的具体建议或观点无任何直接或间接的关系。

署名分析师本人及直系亲属与本报告中涉及的内容不存在任何利益关系。

三、免责声明:

本报告基于本公司研究所及研究人员认为合法合规的公开资料或实地调研的资料,但对这些信息的真实性、准确性和完整性不做任何保证。本报告仅反映研究人员个人出具本报告当时的分析和判断,并不代表东海证券股份有限公司,或任何其附属或联营公司的立场,本公司可能发表其他与本报告所载资料不一致及有不同结论的报告。本报告可能因时间等因素的变化而变化从而导致与事实不完全一致,敬请关注本公司就同一主题所出具的相关后续研究报告及评论文章。在法律允许的情况下,本公司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。

本报告仅供“东海证券股份有限公司”客户、员工及经本公司许可的机构与个人阅读和参考。在任何情况下,本报告中的信息和意见均不构成对任何机构和个人的投资建议,任何形式的保证证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效,本公司亦不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。本公司客户如有任何疑问应当咨询独立财务顾问并独自进行投资判断。

本报告版权归“东海证券股份有限公司”所有,未经本公司书面授权,任何人不得对本报告进行任何形式的翻版、复制、刊登、发表或者引用。

四、资质声明:

东海证券股份有限公司是经中国证监会核准的合法证券经营机构,已经具备证券投资咨询业务资格。我们欢迎社会监督并提醒广大投资者,参与证券相关活动应当审慎选择具有相当资质的证券经营机构,注意防范非法证券活动。

上海东海证券研究所

地址:上海市浦东新区东方路1928号东海证券大厦
 网址: [Http://www.longone.com.cn](http://www.longone.com.cn)
 座机: (8621) 20333275
 手机: 18221959689
 传真: (8621) 50585608
 邮编: 200125

北京东海证券研究所

地址:北京市西三环北路87号国际财经中心D座15F
 网址: [Http://www.longone.com.cn](http://www.longone.com.cn)
 座机: (8610) 59707105
 手机: 18221959689
 传真: (8610) 59707100
 邮编: 100089