

下一代光伏电池新秀，产业化曙光初现

-----钙钛矿行业深度报告

电新首席证券分析师：曾朵红
执业证书编号：S0600516080001
联系邮箱：zengdh@dwzq.com.cn

新能源首席证券分析师：陈瑶
执业证书：S0600520070006
联系邮箱：chenyao@dwzq.com.cn

2023年02月06日

- ◆ **提效快、成本低，钙钛矿潜力十足！** 钙钛矿为有机无机金属卤化物ABX₃，可由人工合成，配方达几十万种，且材料光电损失小。**效率上：**晶硅电池理论效率极限29.4%，目前最高已达26.8%，而单结钙钛矿肖克利极限33.7%，可调整配方来靠近理论上限。钙钛矿叠层发展潜力更广！**成本上：**钙钛矿材料可人工合成、原材料成本低、不易受限，GW级别量产钙钛矿材料成本占比约3%，组件成本<1.0元/W，5-10GW级别量产，组件成本可降至0.5-0.6元/W。**应用上：**钙钛矿具备轻薄、可弯曲特性、同时颜色可调节，在BIPV和车顶光伏市场具备竞争力，可广泛应用于各种场景，有望成为新一代光伏发电明星材料！
- ◆ **单结/叠层多元发展，钙钛矿技术百花齐放！** 钙钛矿电池结构主要分为**单结和多结叠层电池**。单结电池结构分为介孔结构和平面正式或反式结构，目前单结电池产业化主要为平面反式结构。叠层结构分为窄带隙底电池、互联结/隧穿结、宽带隙顶电池三部分；两端叠层成本低、寄生吸收少，两电池电流需严格匹配，具备产业化生产前景；目前钙钛矿/晶硅叠层研究进展领先，实验室效率最高可达32.5%。不同技术路线各有优劣，目前晶硅大厂倾向选择钙钛矿/晶硅叠层的路线，全钙钛矿路线更适合初创企业。
- ◆ **工艺铸就核心竞争力，设备国产化降本可期！** 钙钛矿电池组件生产共需要**镀膜、激光、涂布、封装四种设备**，镀膜设备价值量最高。目前MW级产线设备总投资约1.2亿元，其中镀膜：激光：涂布：封装设备投资比例为50%：25%：15%；10%，未来镀膜设备国产化为降本主要途径；钙钛矿层作为电池的最核心层主流方法采用狭缝涂布机制备，德沪涂膜产业化进程领先，2022年市占率达70%以上；激光设备国产化进程较快，封装设备承接晶硅组件封装，传统供应商有望受益。
- ◆ **技术+政策+资金助力，产业化曙光初现！** 钙钛矿产业化阶段具有寿命及稳定性、大面积制备难度、铅污染等问题，目前业内通过添加剂、组分工程、设备工艺改良、加强封装等多种手段来应对。协会推动建立行业标准，多家公司的钙钛矿产品通过IEC双85测试，进入量产阶段。目前纤纳光电、协鑫光电、极电光能产业化进度领先，**百兆瓦级别产线已搭建完成，GW级产线筹备中，23年或有GW级设备招标**；众能/仁烁/万度光能、宝馨科技、奥联电子、宁德时代百兆瓦级别产线搭建中，预计23/25/30年全国合计钙钛矿组件产能1.25/7.4/142GW，产业化在即！
- ◆ **市场空间广阔，钙钛矿前景星辰大海！** 需求端看，光伏装机需求向好+渗透率提升带动钙钛矿市场空间广阔，2025/2030年全球地面电站钙钛矿需求分别为0.3/25.0GW，2025/2030全球分布式钙钛矿需求分别2.3/70.5GW,2025/2030整体市场空间为2.6/95.5GW,2022-2030CAGR达146%，市场空间广阔。
- ◆ **投资建议：** 降本增效促进下，钙钛矿有望成为下一代光伏电池技术方向，重点关注：**1) 钙钛矿组件：隆基绿能、天合光能、晶澳科技、晶科能源、通威股份，关注东方日升、杭萧钢构、奥联电子等；2) 设备：关注捷佳伟创、迈为股份、京山轻机、大族激光、帝尔激光、德龙激光、杰普特、奥来德、德沪涂膜（未上市）；3) 封装：福斯特、海优新材，关注天洋新材、激智科技；4) TCO玻璃：关注金晶科技、耀皮玻璃。5) 关注钙钛矿领先创业公司：纤纳光电、协鑫光电、仁烁光能、极电光能、耀能科技、黑晶光电等（未上市）。**
- ◆ **风险提示：** 竞争加剧，政策超预期变化，可再生能源装机不及预期，原材料供给不足等。



- Part1: 提效快、成本低，钙钛矿潜力十足
- Part2: 单结/叠层多元发展，钙钛矿技术百花齐放
- Part3: 工艺铸就核心竞争力，设备国产化降本可期
- Part4: 技术+政策+资金助力，产业化曙光初现
- Part5: 市场空间广阔，钙钛矿前景星辰大海！

PART1 提效快、成本低，钙钛矿潜力十足

- ◆ **钙钛矿材料是有机无机金属卤化物 ABX_3 ，可由人工合成，材料性质可使光电损失小。**钙钛矿材料是 ABX_3 型八面体结构，原材料储量丰富，可广泛由人工合成；钙钛矿材料具备高光电吸收系数、长载流子扩散长度、浅缺陷能级，多方面促成钙钛矿光电损失小。
- ◆ **钙钛矿电池具有降本增效、高弱光效应、应用场景广阔优势，是新一代量产光伏电池的优良选择。**钙钛矿带隙可调节，通过不同带隙电池叠层，可最大程度吸收光子，效率上限远高于晶硅电池极限；钙钛矿具备高光吸收系数，电池在阴天以及日出、日落等弱光场景也能正常工作；钙钛矿电池可广泛应用于BIPV和车顶光伏，下游市场广阔。
- ◆ **钙钛矿电池结构主要分为单结和叠层结构，叠层结构效率上限高，但是技术难关多，目前钙钛矿/晶硅叠层是大部分厂商选择的技术路线。**单结钙钛矿电池结构是类似三明治层状的5层结构，结构简单；叠层电池是宽带隙电池和窄带隙电池堆叠，以实现光谱最大程度吸收，目前双结叠层钙钛矿电池效率可突破43%，但是叠层电池存互联层光电损失大、底电池不稳定等问题，技术方面有望进一步升级。综合考虑叠层电池效率、成本、工艺难度，目前大部分晶硅厂商为发挥晶硅技术优势，选择钙钛矿/晶硅叠层路线。

图：钙钛矿电池组件

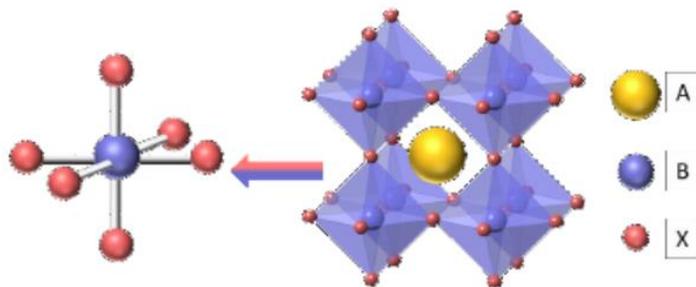


- ◆ 1839年，在俄罗斯乌拉尔山脉，德国矿物学家GustavRose发现了矿物质钛酸钙 $CaTiO_3$ ，之后俄国矿物学家Lev Alekseyevich von Perovski将其命名为“**Perovskite**”。后来 ABO_3 型氧化物的简单钙钛矿被广泛研究，于是人们以“perovskite”一词来描述庞大的钙钛矿家族及其衍生化合物。
- ◆ 目前光伏领域的钙钛矿材料是指具有半导体特性的**卤素钙钛矿材料 ABX_3** 。
- ◆ **A代表一价有机或无机阳离子**，如甲脒离子($HC(NH_2)^{2+}$)、甲胺离子($CH_3NH_3^+$)、铯离子(Cs^+)、铷离子(Rb^+)或者多种阳离子混合等。
- ◆ **B代表二价金属阳离子**，如铅离子(Pb^{2+})、锡离子(Sn^{2+})、锗离子(Ge^{2+})，或者多种金属离子混合等。
- ◆ **X代表一价卤素阴离子**，如溴离子(Br^-)、碘离子(I^-)、氯离子(Cl^-)，或者多种卤素离子混合等。
- ◆ ABX_3 的晶体结构是1个金属B原子与6个卤素X原子配位形成 $[BX_6]$ **八面体结构**，A原子被周围的共享顶点的8个八面体骨架包围。
- ◆ 当满足上述晶体元素和结构，基本能成为光伏领域所需的钙钛矿材料，意味着**钙钛矿材料能够广泛地由人工合成，不再受原材料掣肘**。

图：钙钛矿

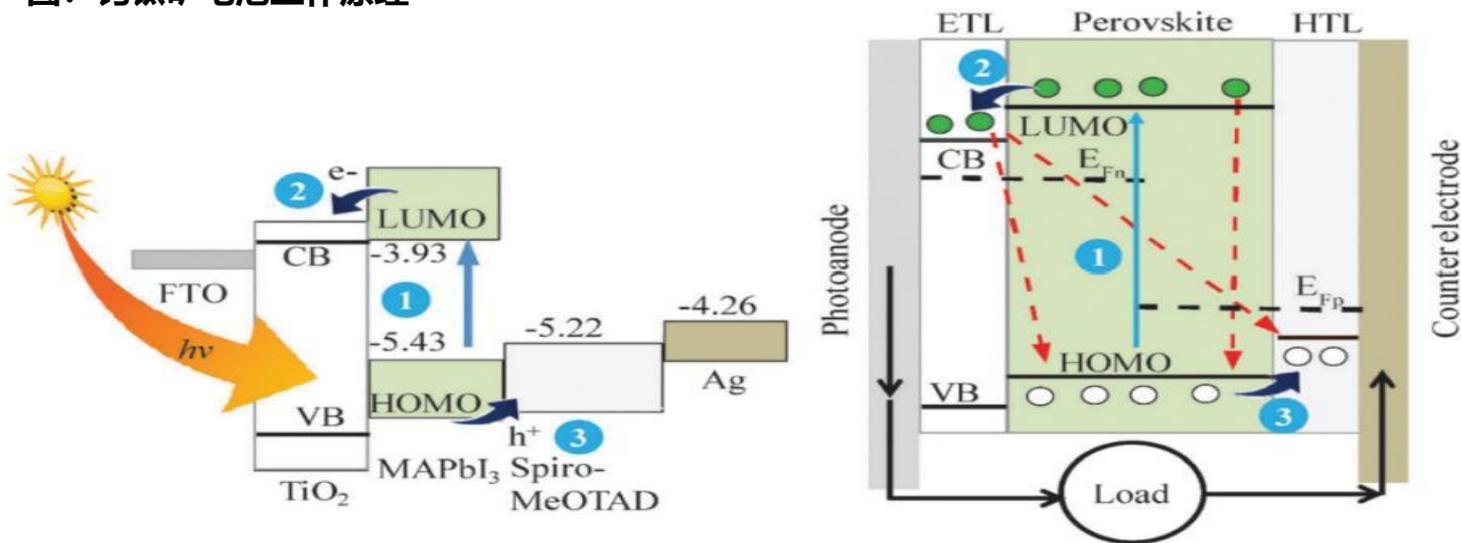


图：钙钛矿晶体结构



- ◆ 钙钛矿作为一种半导体材料，会产生**光生伏特效应**，即半导体在光照下会产生电动势。其光电转化过程主要包括以下几个过程：
- ◆ **1) 钙钛矿光电吸收层 (Perovskite)** 具备高光吸收系数，吸收太阳光后容易产生电子-空穴对，并在室温下被热化后会形成激子，然后发生电荷分离，光生电子跃迁到吸光层的LUMO能级上，光生空穴跃迁到吸光层的HOMO能级上。①
- ◆ **2)** 分离的自由电荷具有长的载流子寿命和扩散距离使得它们能够在复合前被有效的提取和传输，其中**电子传输层 (ETL)** 提取并传输电子且能够快速地阻挡空穴②，同时对应的**空穴传输层 (HTL)** 提取并传输空穴且也能够快速地阻挡电子。③
- ◆ **3)** 被提取地载流子经过传输层传输进一步被相应的**阳极导电玻璃 (photoanode)** 和**阴极金属电极 (counter electrode)** 所收集并经过负载外电路形成回路。

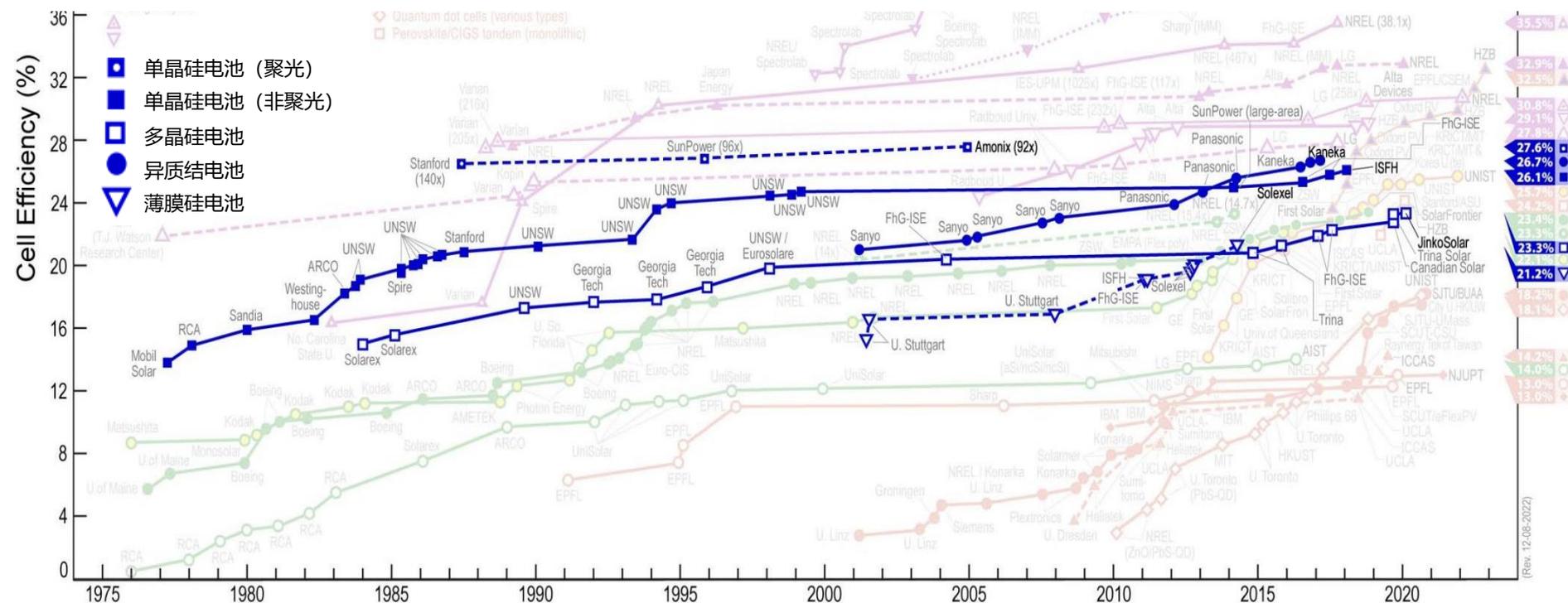
图：钙钛矿电池工作原理



钙钛矿优势：效率进展迅速，理论极限高

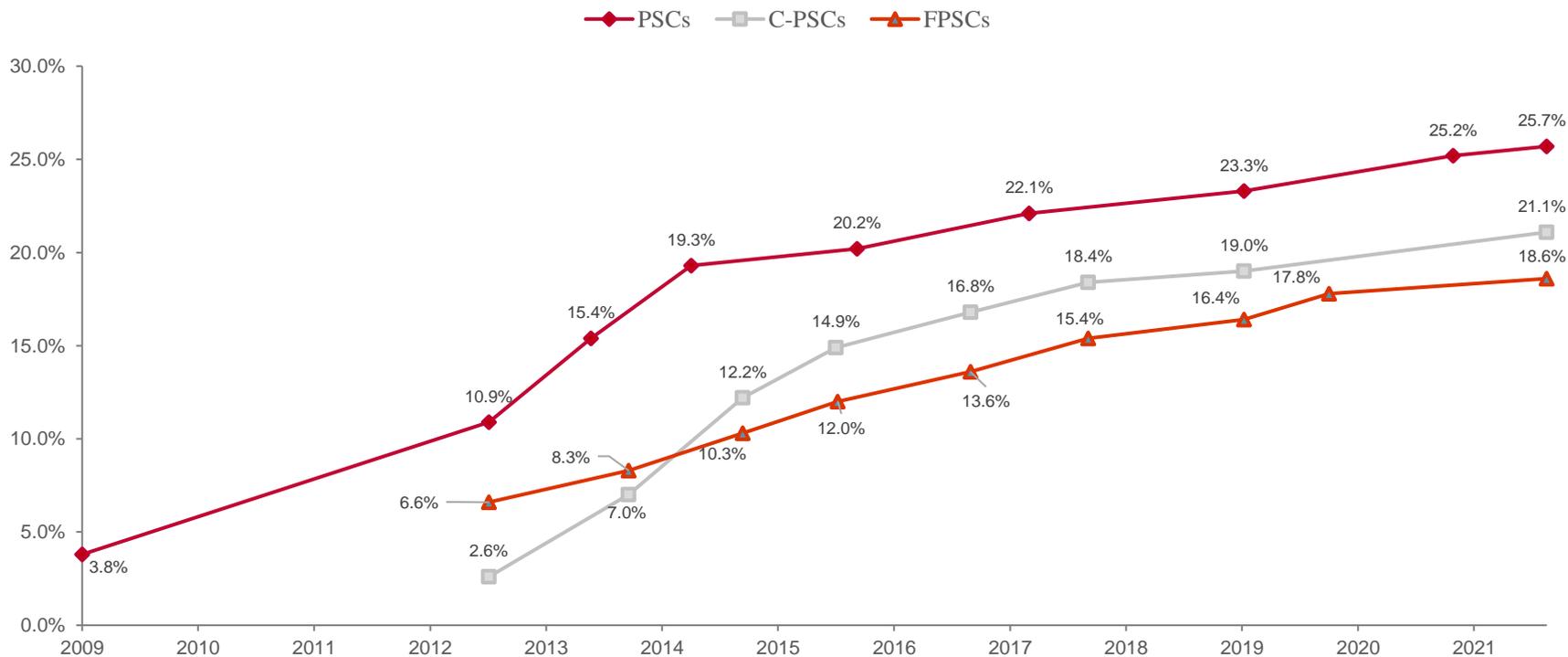
- ◆ **晶硅电池效率即将接近极限，下一代钙钛矿潜力充足。** 晶硅电池经过40余年的发展，实验室转换效率逼近27%，接近极限；钙钛矿电池具备光电损失小、带隙可调节特点，叠加叠层技术，可实现接近两倍晶硅电池效率，潜力充足。
- ◆ **晶硅电池理论效率极限为29.4%，目前最高效率已达到26.8%。** 晶硅太阳能电池被俄歇复合限制在理论效率为29.4%，考虑到现实中的光学损失与电学损失，最终可以达到的效率上限可能进一步降低至27%；2017年日本的Kaneka公司研发的HJT电池以26.7%晶硅电池效率最高记录保持5年，2022年12月隆基HJT效率达26.81%，成为新世界纪录。

图：晶硅电池实验室最高效率



- ◆ **钙钛矿材料光电损失小。**钙钛矿材料具备长的载流子扩散长度、浅的缺陷能级，因而载流子复合率低，寿命可高达几微秒到几十微秒，光电损失较小。
- ◆ **单结效率上限可达30%以上。**根据Shockley-Queisser极限，单结太阳能电池吸光材料的禁带宽度在1.34eV时，其理论光电转换效率可达最高的33.7%，典型的甲胺铅碘(CH₃NH₃PbI₃)钙钛矿带隙为1.55eV，接近最优带隙，单结效率上限可达30%以上。目前**钙钛矿最高单结效率已达到25.7%**。

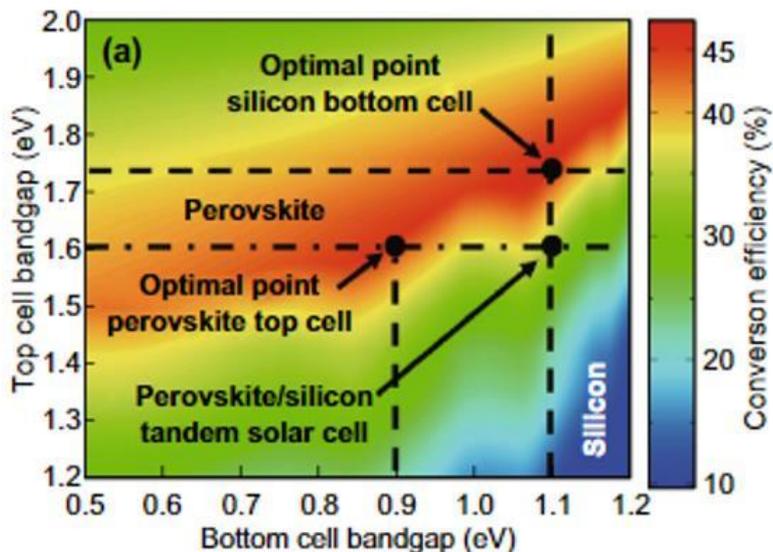
图：单节钙钛矿效率发展历程



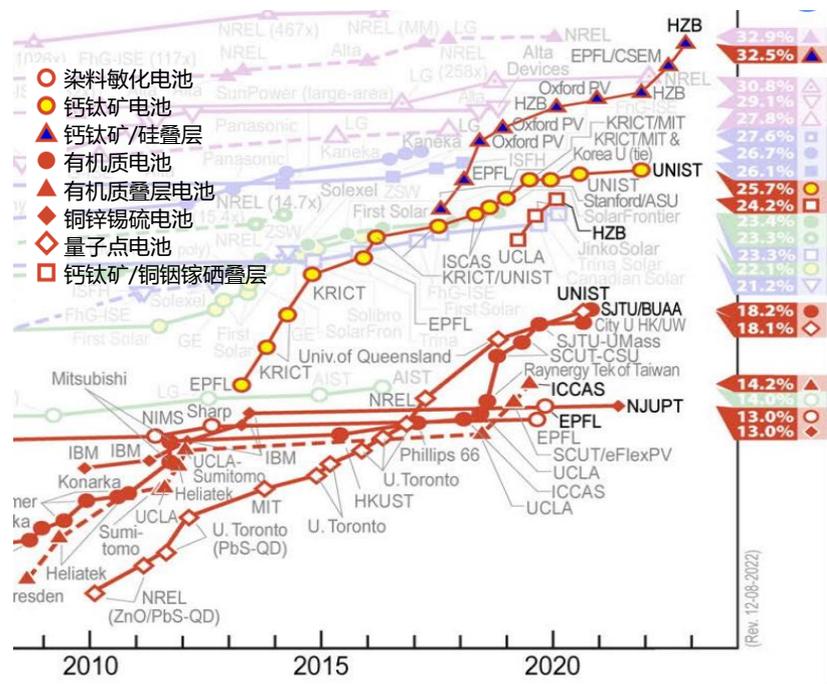
钙钛矿优势：带隙可调，叠层电池潜力十足

- ◆ **钙钛矿材料带隙可调节。**带隙是半导体可以吸收的最低能量，半导体无法吸收能量小于带隙的光子，能从光子获得的能量也不会超过带隙能量，钙钛矿材料带隙可调节，与晶硅材料或者和经过人工调整的钙钛矿材料叠层后，就可以覆盖大范围带隙，因而能够吸收不同波长的光。
- ◆ **与晶硅叠层，理论效率超过43%。**采用1.12eV带隙的晶硅电池与1.73eV钙钛矿电池串联，可以保证太阳光谱照射的最佳分布吸收，全谱匹配两结叠层电池的效率理论极限可超过43%，即便使用典型钙钛矿甲胺铅碘(带隙1.55eV)作为顶部电池时理论最大效率也能达到33%。
- ◆ **钙钛矿/晶硅两结叠层电池效率已经达到32.5%**（德国HZB研究中心22年12月最新认证）。

图：钙钛矿两结叠层在不同带隙下理论效率



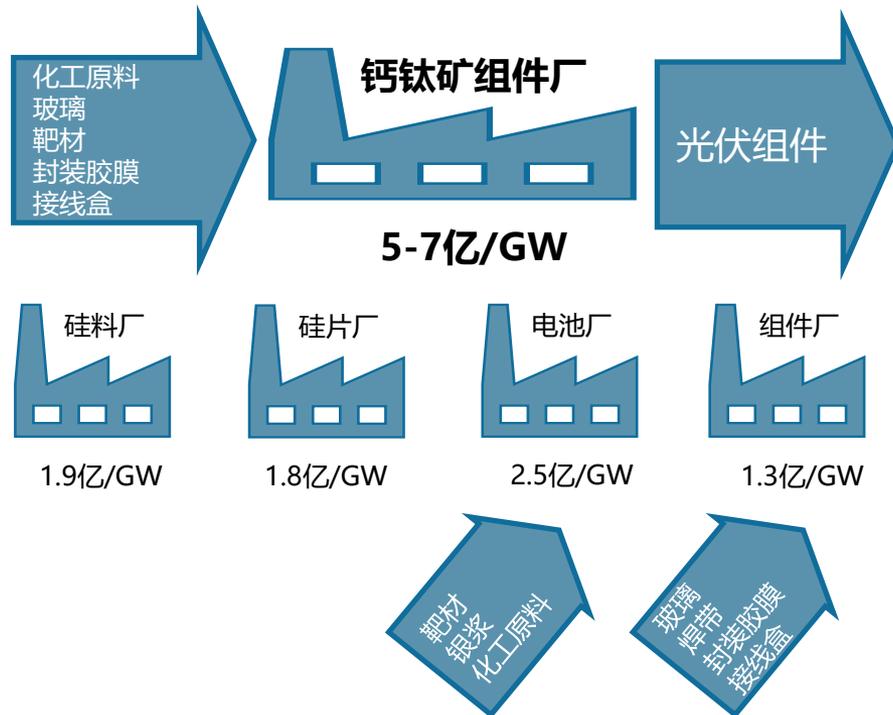
图：新概念电池实验室效率



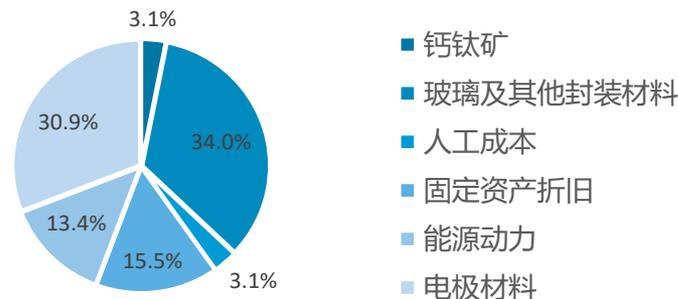
钙钛矿优势：成本更低、工艺步骤简单

- ◆ **产能投资：**钙钛矿组件目前产能投资略低于晶硅组件，未来仍有下降空间。钙钛矿组件生产流程简单，可在45分钟内将化工原料、玻璃、靶材、胶膜在单一工厂加工为组件，目前GW级别晶硅组件产能投资需要7.5亿元，钙钛矿组件投资需5-7亿元，略低于晶硅。考虑到目前钙钛矿电池处于起步阶段，晶硅电池产业链已经成熟，预计未来钙钛矿组件产能投资大幅小于晶硅组件。
- ◆ **组件成本：**钙钛矿材料制备所需原材料储量丰富、价格低廉，且钙钛矿材料本身占组件成本比例较低。以协鑫光电为例，GW级别量产，钙钛矿材料占比3.1%，组件成本<1.0元/W，5-10GW级别量产，组件成本可降至0.5-0.6元/W。

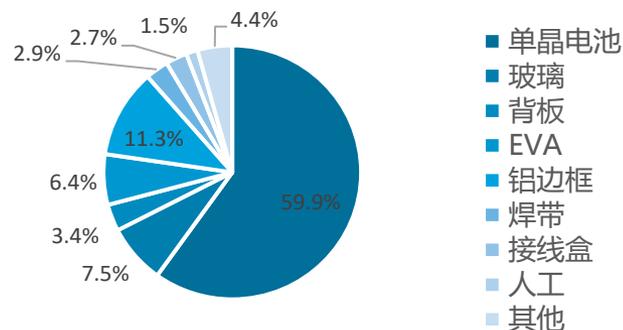
图：钙钛矿&晶硅产能投资对比



图：钙钛矿组件GW级别量产成本构成

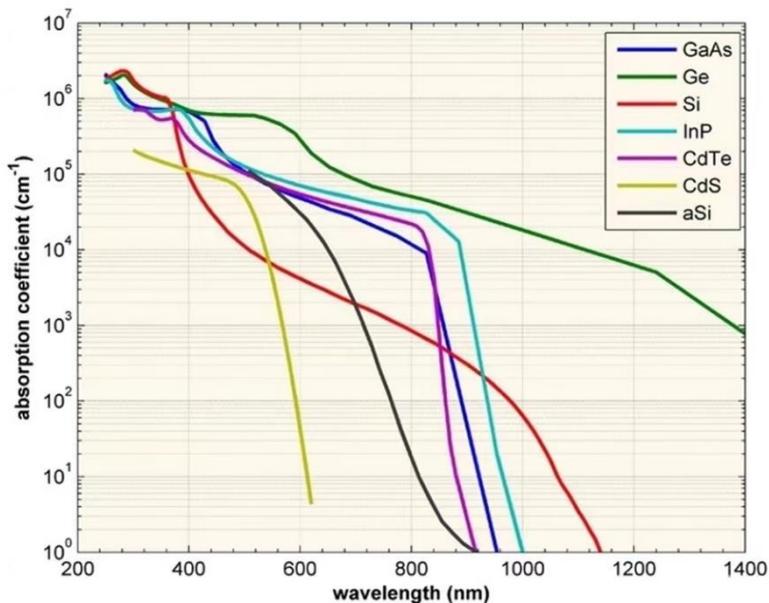


图：晶硅组件成本构成

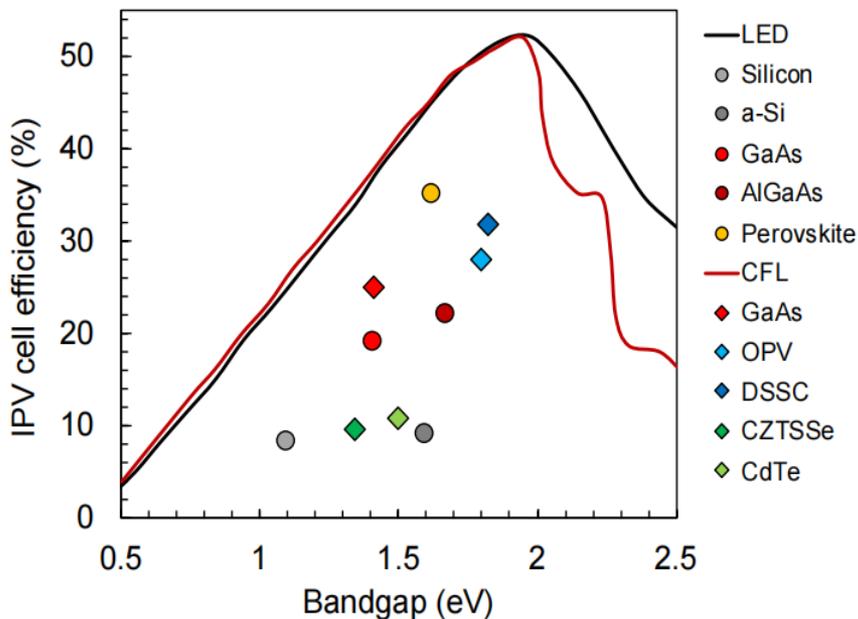


- ◆ **钙钛矿光吸收系数高，弱光效应好。** 由于光吸收系数倒数的物理意义是，当光强衰减到入射光强度的 $1/e$ 时，光所经过样品的厚度，所以光吸收系数越高，同等材料厚度下所需光照少。晶硅电池在可见光范围吸收系数不到 10^4cm^{-1} ，钙钛矿材料厚度仅百纳米时，吸收系数就可以达到 10^5cm^{-1} ，光系数高，捕光能力强，具备较好弱光效应。
- ◆ **钙钛矿带隙高，弱光效应好。** 在弱光下，电池带隙接近 2eV 时，理论最高效率可达 52% ，晶硅电池带隙 1.1eV ，远小于 2eV ，钙钛矿电池带隙 $1.55\text{-}1.7\text{eV}$ ，接近 2eV ，在阴雨天气和日出日落等弱光场景，能够维持较高电池效率，保持稳定运转。

图：半导体在不同波长光下吸收系数



图：弱光条件下，光伏电池带隙和效率关系



- ◆ **钙钛矿电池可用于制作BIPV幕墙和屋顶。** 23年分布式光伏在商业建筑和公共建筑的立墙应用占比预计分别可达到15%、20%，在商业建筑和公共建筑的屋顶应用占比预计分别可达到15%、30%，BIPV应用市场广阔。钙钛矿电池具备轻薄特性、高转换效率优势，同时颜色可调节，在BIPV市场具备竞争力。
- ◆ **全球新能源汽车维持高速增长，钙钛矿电池可用于制作车顶光伏。** 23年全球新能源汽车预计可突破1300万辆，可安装光伏电池面积预计可达30万平米，是未来光伏领域重要开拓市场。钙钛矿电池具备高弱光效应，在不良天气条件下，有利于维持稳定发电，是作为车顶光伏的优良材料。

图：BIPV幕墙



图：光伏车顶



总结：钙钛矿优势明显，产业化潜力十足

- ◆ **钙钛矿电池相对于晶硅电池效率上限更高。**钙钛矿电池具备高光吸收系数、受温差影响小，光电损失少，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%，而晶硅电池效率难以突破30%。
- ◆ **钙钛矿电池相对于晶硅电池成本更低。**钙钛矿电池产能投资约5-7亿元/GW，未来成熟后有进一步下降空间；GW级量产组件成本小于1元/GW，有望向0.5元/GW靠拢，可实现全口径平价上网，而晶硅电池成本较高。
- ◆ **钙钛矿电池相对晶硅电池具备高弱光效应。**钙钛矿材料在可见光范围吸收系数可以达到 10^5cm^{-1} ，具备高光捕获能力；并且电池带隙，接近弱光下电池最高效率所需带隙，因此在阴雨天气和日出日落等弱光环境均能工作。
- ◆ **钙钛矿电池下游应用领域广阔。**钙钛矿电池在分布式光伏市场具备竞争力，可广泛应用于BIPV幕墙和屋顶，此外也是光伏车顶的优良材料。

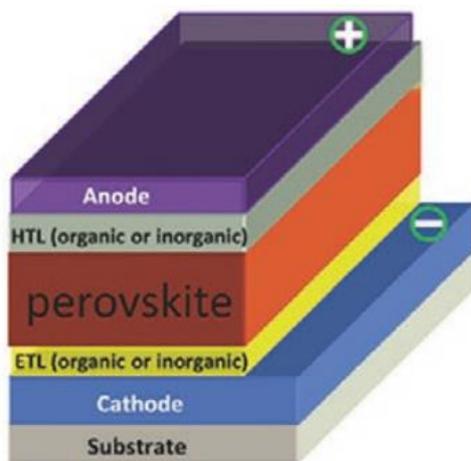
图：钙钛矿电池与晶硅电池对比

比较内容	晶硅	钙钛矿
发展时间	50年	10年
技术体系	第一代晶体	第三代薄膜
效率上限	27-29%	30-33%
实验室效率	26.81%	25.70%
使用寿命(T80)	25年	10-20年
带隙宽度	1.1eV	1.17~2.8eV调节
吸光范围	400-1200nm	350-800nm
器件厚度	>150um	500nm
弱光效应	差，阴雨天气和日出日落基本不工作	好，阴雨天气和日出日落能工作
温度效应	高，受温度影响较大(大10倍)	低，适合极端低温和高温
综合成本	高，全口径平价上网还需努力	低，可全口径实现平价上网
柔性电池	难以制备为柔性电池	易制备为柔性电池

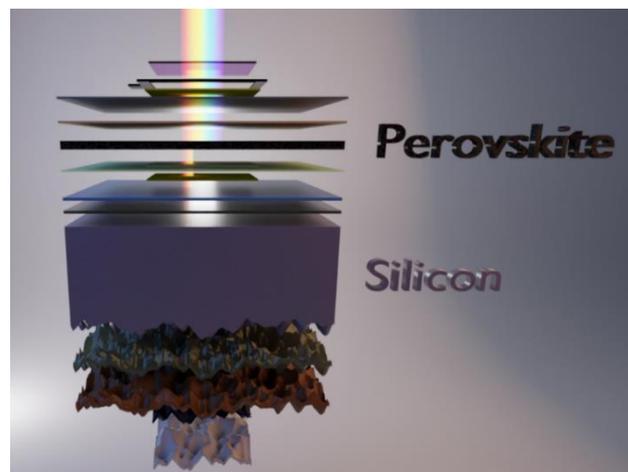
PART2 单结/叠层多元发展，钙钛矿技术百花齐放

- ◆ **钙钛矿电池目前研究进展主要分为单结电池和多结叠层电池。**钙钛矿单结电池不需要依托PN结就能产生光生伏特效应，结构简单，仅有五层；由于钙钛矿带隙可调节，因此可以搭配其他半导体材料进行叠层，叠层后的多结电池可以覆盖大部分带隙，实现光子全方位吸收，实现电池效率成倍增长。
- ◆ **单结电池产业化生产主要为平面反式结构。**单结钙钛矿电池结构可分为介孔结构和平面结构，平面结构又可分为正式结构和反式结构；透明导电电极、电子传输层、钙钛矿光电吸收层、空穴传输层、金属电极为主要结构要素；由于平面反式结构具备可低温制备、稳定性较高优势，目前广泛用于产业化生产。
- ◆ **钙钛矿/晶硅叠层研究进展领先，两端叠层方式具备产业化生产前景。**目前主流钙钛矿叠层技术为：钙钛矿/晶硅叠层、钙钛矿/钙钛矿叠层、钙钛矿/CIGS叠层，由于钙钛矿/晶硅叠层具备底电池（晶硅电池）技术成熟稳定的优势，在诸多叠层中研究进展最快，实验室效率领先。两端叠层方式，是指子电池通过互联界面串联，仅需一个透明电极，成本较低，在工艺方面具备发展前景。

图：单结电池结构（平面正式结构为例）



图：叠层电池结构（钙钛矿/晶硅叠层为例）



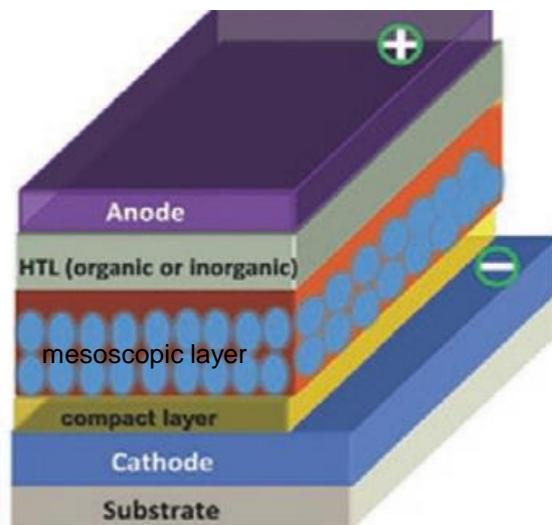
- ◆ 单结电池结构主要分为介孔结构和平面结构，平面结构又被分为正式结构(n-i-p)和反式结构(p-i-n)。根据有无介孔骨架电子传输层 (mesoscopic layer)，区分介孔结构和平面结构；根据透明导电电极上先为电子传输层，还是先为空穴传输层，区分正式结构和反式结构。
- ◆ 平面反式结构器件可低温制备、稳定性好，是产业化生产的主流结构。介孔结构的介孔层需要高温制备，工艺难度较大，平面结构没有介孔层，可低温制备，节省能源；反式结构采用无机金属氧化物替代有机物Spiro-OMeTAD作为空穴传输层，稳定性较好。

图：单节钙钛矿电池结构



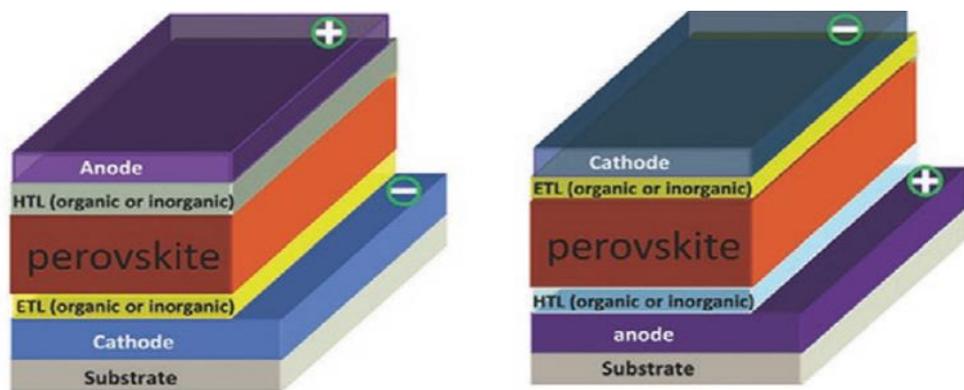
- ◆ **介孔结构类似三明治层状结构**，结构简单，主要分为5层：**1) 透明导电电极**：主要作用是将收集到的电子传输到外电路，同时具备较高光透过率，目前主要采用FTO玻璃。**2) 介孔电子传输层**：将钙钛矿受光子激发后的电子提取出来，同时阻挡空穴向阴极方向迁徙；具备较高光透过率，便于更多光子照在钙钛矿吸收层上；介孔为钙钛矿吸收层提供骨架支撑的作用；主要材料是TiO₂。**3) 钙钛矿吸收层**：受到光子激发，形成电子-空穴对，产生光电效应。**4) 空穴传输层**：传输空穴，阻止电子传输；主要材料是有机物Spiro-OMeTAD。**5) 金属电极**：传输电子，主要材料是银。
- ◆ **介孔能够作为骨架支撑钙钛矿，但是高温制备，工艺难度大。**介孔有钙钛矿支撑骨架作用，增大钙钛矿吸收层与电子传输层的接触面积，有效提高电子传输效率；介孔层的制备通常需要400-500°C的高温退火处理，增加了工艺难度。

图：介孔结构



- ◆ **平面结构相对于介孔结构少了介孔层，可低温制备。**平面结构直接在致密TiO₂电子传输层上旋涂钙钛矿，结构相对介孔结构简单，能够用低温溶液法制备，更利于柔性电池、叠层电池和大面积电池的发展。
- ◆ **正式结构和反式结构主要区别是，光先透过电子传输层还是空穴传输层。**对正式结构而言，透明电极上为电子传输层，太阳光穿过透明电极后，透过电子传输层再到吸光层；对反式结构而言，透明电极上为空穴传输层，太阳光穿过透明电极后，透过空穴传输层再到吸光层。
- ◆ **反式结构尽管效率不及正式结构，但迟滞较小、填充率较高、稳定性更好，适合量产。**目前钙钛矿最高效率25.7%是正式结构，反式结构经过多年发展也达到了24.3%的效率，与正式结构差距减小。反式结构的主要优势在于，光先透过空穴传输层，可以使电池迟滞性较小，填充率较高。另外，正式结构空穴传输材料多为有机物Spiro-OMeTAD，同时为了增加导电性通常需要添加对水氧敏感的Li盐、Co盐等，尽管获得了高效率但也牺牲了器件的稳定性；反式结构空穴传输层材料多为无机金属氧化物(如NiO_x、CuO等)，器件稳定性好。

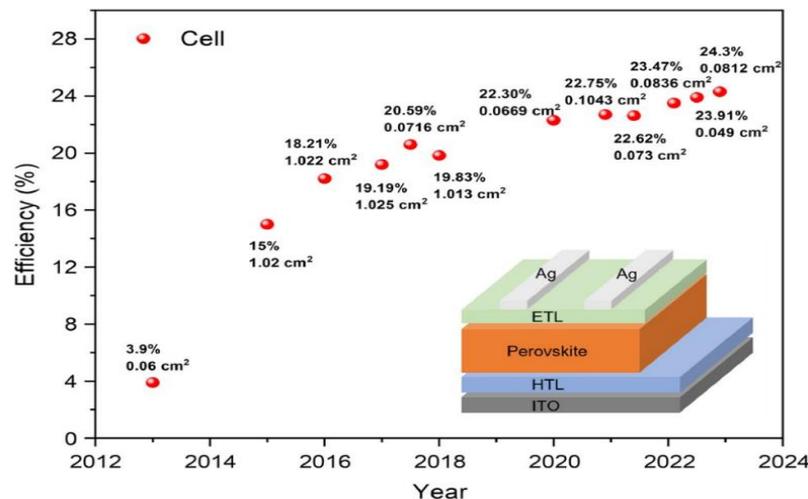
图：平面结构



平面正式结构

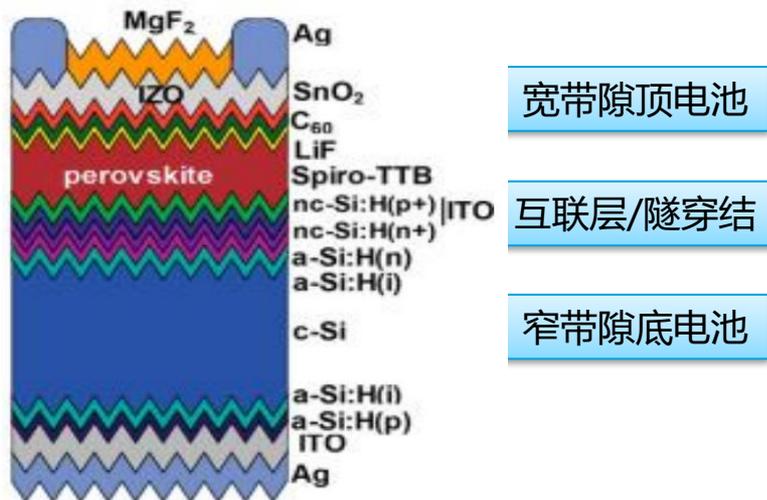
平面反式结构

图：反式结构效率

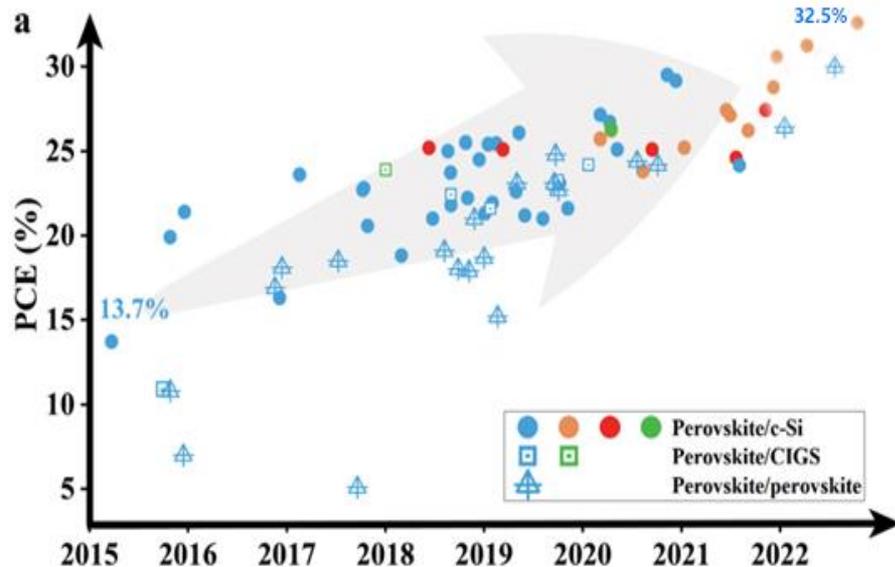


- ◆ **叠层结构分为窄带隙底电池、互联结/隧穿结、宽带隙顶电池三部分。** 宽带隙电池作为顶电池吸收较高能量光子，窄带隙电池作为底电池吸收较低能量光子，实现子电池对太阳光谱分段利用，从而避免高能光子的热化损失，提高太阳能利用率和电池光电转换效率。钙钛矿 ABX_3 通过改变 A、B、X组分可实现带隙宽度从 1.17~2.8 eV 调节，能够与其他中窄带隙底电池匹配。
- ◆ **两结叠层电池为主要应用方向，钙钛矿/晶硅叠层目前效率最高。** 叠层的结数越多，理论上可以获得更高的效率，但是考虑到成本，目前两结叠层电池为主要应用方向；钙钛矿/晶硅叠层和钙钛矿/钙钛矿叠层的电池效率较高，分别为32.5%和28%，成为目前叠层电池研究领域的焦点，钙钛矿/CIGS 叠层电池效率也获得了很大提升，成为下一代光伏电池很有潜力的竞争者。

图：叠层电池结构（以钙钛矿/晶硅叠层为例）

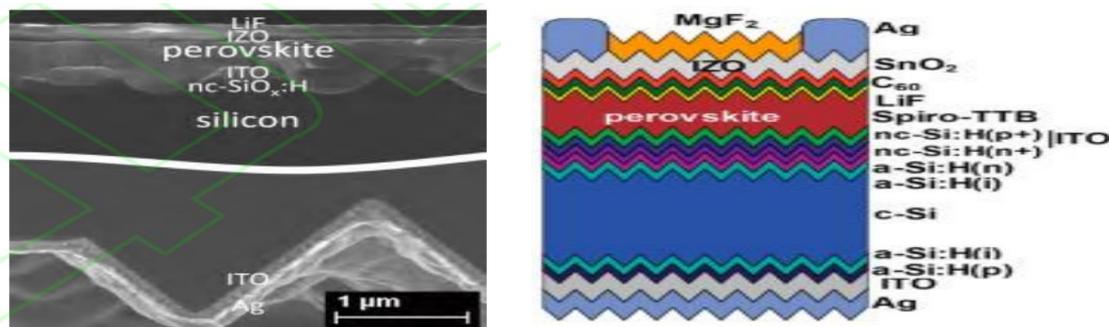


图：钙钛矿叠层实验室发展历程



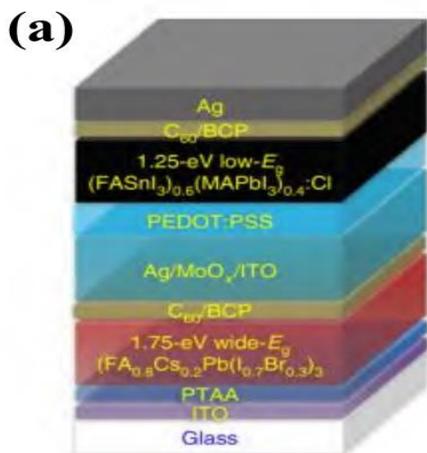
- ◆ **钙钛矿/晶硅叠层，是以晶硅作为底电池。** 晶硅电池带隙较窄，只有 1.12eV，作为叠层的底电池，宽带隙（1.67eV-1.75eV）的钙钛矿作为顶电池。
- ◆ **晶硅电池作为底电池较为稳定，HJT与钙钛矿叠层最为适配。** 晶硅电池工艺成熟，作为底电池较为稳定，相比其他类型叠层具备潜在的低制造成本；HJT由于具备良好的非晶硅钝化层、对称结构以及透明导电氧化物（TCO），与钙钛矿层最为适配。
- ◆ **互联层结构和材质都会造成光电损失。** 1) 互联层结构方面，可以分为平面和陷光结构，平面结构光发射强，不利于透光；陷光结构，光反射弱，但表面凹凸不平，均匀涂抹钙钛矿是一大挑战。 2) 互联层材质方面，多使用TCO，其中最常见的是铟掺杂氧化锡（ITO），具有优良的电导率和光透射率，然而 ITO 折射率与硅基底不匹配，造成800nm 以上波段光反射损失。
- ◆ **钙钛矿/晶硅叠层拥有叠层结构最高效率32.5%，改善互联层材质和钙钛矿顶电池稳定性是突破口。** 缘于晶硅底电池的稳定性，钙钛矿/晶硅整体稳定性最强，研究进展最快，实验室效率最高，德国HZB研究中心22年12月认证最高效率32.5%；a-Si:H 和 nc-Si:H 材料具有横向电导率、寄生损耗和反射损耗低的特点，成为叠层电池中互联层的理想材料；除此之外，和单结电池一样，提升钙钛矿电池本身光电性能，也是叠层电池的核心点，比如通过添加剂工程，降低非辐射复合。

图：钙钛矿/HJT叠层结构图、截面SEM图

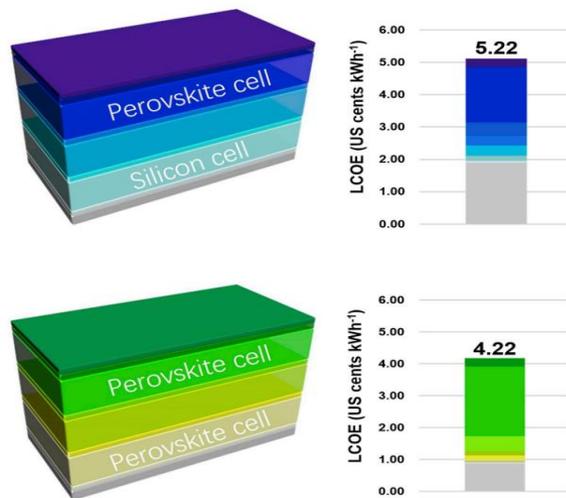


- ◆ **钙钛矿/钙钛矿叠层，是通过人工分别合成宽带隙和窄带隙钙钛矿。** 由于钙钛矿带隙可调节，将窄带隙（1.25eV左右）钙钛矿作为底电池，宽带隙（1.75eV左右）钙钛矿作为顶电池。
- ◆ **钙钛矿/钙钛矿叠层目前效率逐渐赶上钙钛矿/晶硅叠层，度电成本更低，工艺更简单。** 钙钛矿/钙钛矿叠层，两个子电池带隙均可以灵活调节，能够最大程度上实现太阳光谱高效利用，使得开路电压超过了钙钛矿/晶硅叠层电池，目前钙钛矿/钙钛矿叠层最高实验室效率为 29%（南京大学谭海仁团队）。钙钛矿/晶硅叠层度电成本为5.22美分/KWh，钙钛矿/钙钛矿叠层度电成本为4.22美分/KWh，低于晶硅叠层。钙钛矿/钙钛矿叠层是在玻璃上涂抹顶电池，相比钙钛矿/晶硅叠层在晶硅绒面上涂抹钙钛矿工艺简单。
- ◆ **相比钙钛矿/晶硅叠层，全钙钛矿叠层除了需提升宽带隙钙钛矿和互联层性能，还需解决窄带隙钙钛矿不稳定问题。** 窄带隙钙钛矿主要含锡，锡离子易氧化导致钙钛矿不稳定；窄带隙电池沉积过程中存在溶剂对宽带隙钙钛矿电池降解的风险。目前对窄带隙钙钛矿稳定性的提升，主要采用和宽带隙钙钛矿相似的添加剂工程。

图：钙钛矿/钙钛矿叠层结构图

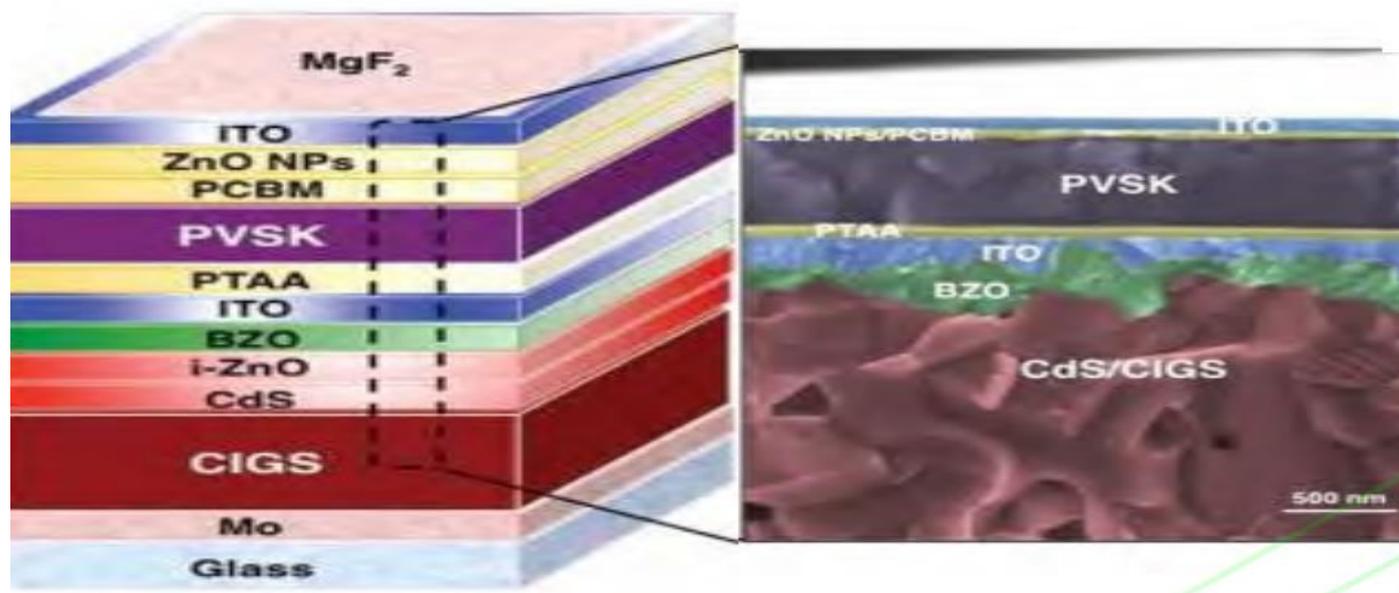


图：度电成本对比



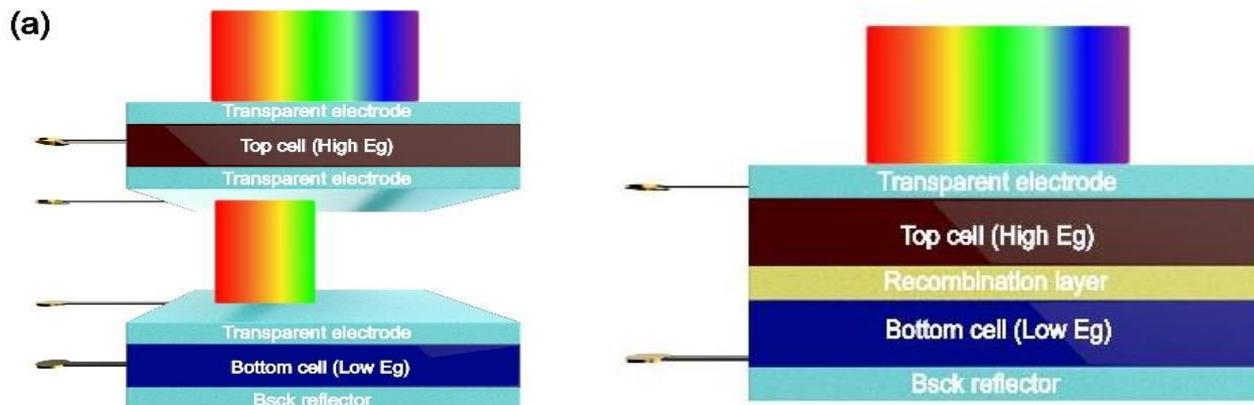
- ◆ **CIGS窄带隙宽度可调，具有较高光吸收系数。**将窄带隙CIGS作为底电池，宽带隙钙钛矿作为顶电池，因为CIGS窄带隙宽度可调且具备高的光吸收系数，理论上可以获得比钙钛矿/晶硅叠层结构更高的光电性能。
- ◆ **钙钛矿/CIGS叠层工艺环节存在分流效应，影响电池效率。**CIGS电池结构限制了顶部钙钛矿只能是 p-i-n (反式) 结构；CIGS电池结构通常通过真空方法沉积，如溅射或共蒸发，往往导致表面粗糙度较大，一般表面高度方均根最高可以达到 200 nm，尽管钙钛矿吸收层的厚度在500-1000 nm 范围，但是空穴传输层厚度不超过100 nm，不足以完全覆盖纳米粗糙表面，导致潜在的分流效应。
- ◆ **钙钛矿/CIGS叠层目前最高实验室效率为 24.2%** (德国HZB研究中心)，在三种叠层技术中较为落后。

图：钙钛矿/CIGS叠层结构图、截面SEM图



- ◆ **四端叠层和两端叠层主要差异——双电路&单电路**：四端叠层两个子电池独立制作，并且两子电池仅在光学上存在联系，电路相互独立。两端叠层在底层电池上直接沉积钙钛矿电池制成，通过互联层或隧道结将两个子电池串联连接。
- ◆ **四端叠层子电池可以最大功率运行，但是总成本高**。四端叠层可以分别设计两个子电池的最佳制造条件，且两个子电池可以相互独立的运行在它们的最大功率点上；但是需要三个电极使用透明电极，以减小寄生吸收，同时电池输出电路的复杂度加倍，总体成本较高。
- ◆ **两端叠层成本低、寄生吸收少，但两个电池电流需严格匹配**。两端叠层只需要一个透明电极，更少的沉积步骤，制造成本极大地降低；电极的减少使得非吸收层的寄生吸收减少，可以期望获得更高的光电流。因其子电池串联的特性工作时两子电池电流必须严格匹配，光线入射角度的变化容易造成电流失配，需要精巧的设计才能获得高效率。
- ◆ 从产业化角度，**两端叠层更有前景**。

图：四端叠层和两端叠层结构



量产路线选择：单结or叠层？钙/晶or钙/钙？

- ◆ **单结or叠层、钙钛矿/晶硅or钙钛矿/钙钛矿叠层，是当前量产技术路线主要区别。**目前工业界出于稳定性、效率、成本的统一考虑，基本比较认同：单结结构方面采用平面反式结构，叠层方式上采用两端叠层。在技术路线上的差异主要表现在做单结还是叠层电池，如果做叠层，是做钙钛矿/晶硅叠层，还是全钙钛矿叠层。
- ◆ **不同技术路线各有优劣，目前晶硅大厂倾向选择钙钛矿/晶硅叠层的路线，全钙钛矿路线比较适合初创企业。**1) 效率上，钙钛矿/晶硅叠层发展最快，效率最高；2) 光电损失上，单结电池损失最小；3) 稳定性上，全钙钛矿电池稳定性最差；4) 成本上，全钙钛矿电池成本度电最低；5) 主流厂商选择路线：量产阶段，单结和叠层电池厂商数量相近，战略规划阶段，大部分厂商选择叠层电池，在叠层电池中，晶硅大厂为发挥技术优势，首选钙钛矿/晶硅叠层。仁烁光能独树一帜选择全钙钛矿叠层，为初创企业技术路线选择提供参考。

表：不同技术路线优劣势对比

比较内容	单结电池	叠层（双结）	钙钛矿/晶硅	钙钛矿/钙钛矿
带隙宽度 (eV)	宽带隙1.55-1.7	宽带隙1.67-1.75, 窄带隙1.12-1.25	宽带隙1.67-1.75, 窄带隙1.12	宽带隙1.75, 窄带隙1.25
理论效率	Shockley-Queisser极限33%	突破43%	突破43%	比钙钛矿/晶硅叠层高
实验室最高效率	25.7%	32.5%	32.5%	29.0%
结构	类似三明治5层结构	宽带隙/窄带隙电池堆叠，存在互联界面	宽带隙/窄带隙电池堆叠，存在互联界面	宽带隙/窄带隙电池堆叠，存在互联界面
光电损失	钙钛矿电池非辐射复合	钙钛矿电池非辐射复合、互联层光反射损失	宽带隙钙钛矿电池非辐射复合、互联层光反射损失	宽带隙和窄带隙钙钛矿电池非辐射复合、互联层光反射损失
稳定性	钙钛矿本身结构缺陷导致不稳定	钙钛矿本身结构缺陷导致不稳定	宽带隙钙钛矿结构缺陷导致不稳定	宽带隙钙钛矿结构缺陷导致不稳定、窄带隙钙钛矿相比宽带隙更不稳定
成本 (LCOE, 美分/KWh)	4.34	4.22-5.22	5.22	4.22
优势	只需解决宽带隙钙钛矿问题，技术难度稍小，而且做叠层也需先解决单结钙钛矿电池存在的问题；度电成本低	效率上限高	效率上限高；底电池工艺成熟，稳定性好；充分发挥与晶硅产业链协同作用；目前科研进展最快	效率上限高；度电成本最低；互联层技术难度相对钙钛矿/晶硅叠层小；上下电池寿命一致；钙钛矿底电池工艺整体比晶硅电池简单
劣势	效率上限低	需要解决钙钛矿电池和互联层两方面问题，技术难度大	互联层技术难度大；度电成本高；晶硅和钙钛矿电池寿命不一致；晶硅电池工艺整体比钙钛矿底电池难	额外需要解决窄带隙钙钛矿不稳定的问题，需要精细控制钙钛矿配方
主要企业（量产/中试线）	协鑫光电、纤纳光电、极电光能	牛津光伏、杭萧钢构、华晟新能源、仁烁光能	牛津光伏、杭萧钢构、华晟新能源	仁烁光能
主要企业（战略规划阶段）	曜能光电	曜能光电、隆基绿能、天合光能、中来股份、黑晶光电、晶科能源	隆基绿能、天合光能、中来股份、黑晶光电、晶科能源	-

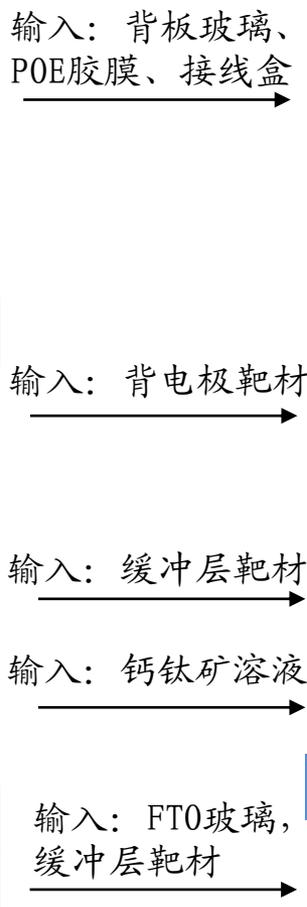
PART3 工艺铸就核心竞争力，设备国产化降本可期

◆ 钙钛矿电池组件生产共需要镀膜设备、激光设备、涂布设备、封装设备四种设备。钙钛矿组件生产中材料、工艺、设备互相配合铸就钙钛矿企业的核心竞争力。从工艺角度出发，钙钛矿电池组件在生产中需要用到4类设备，已有部分国产化选择。

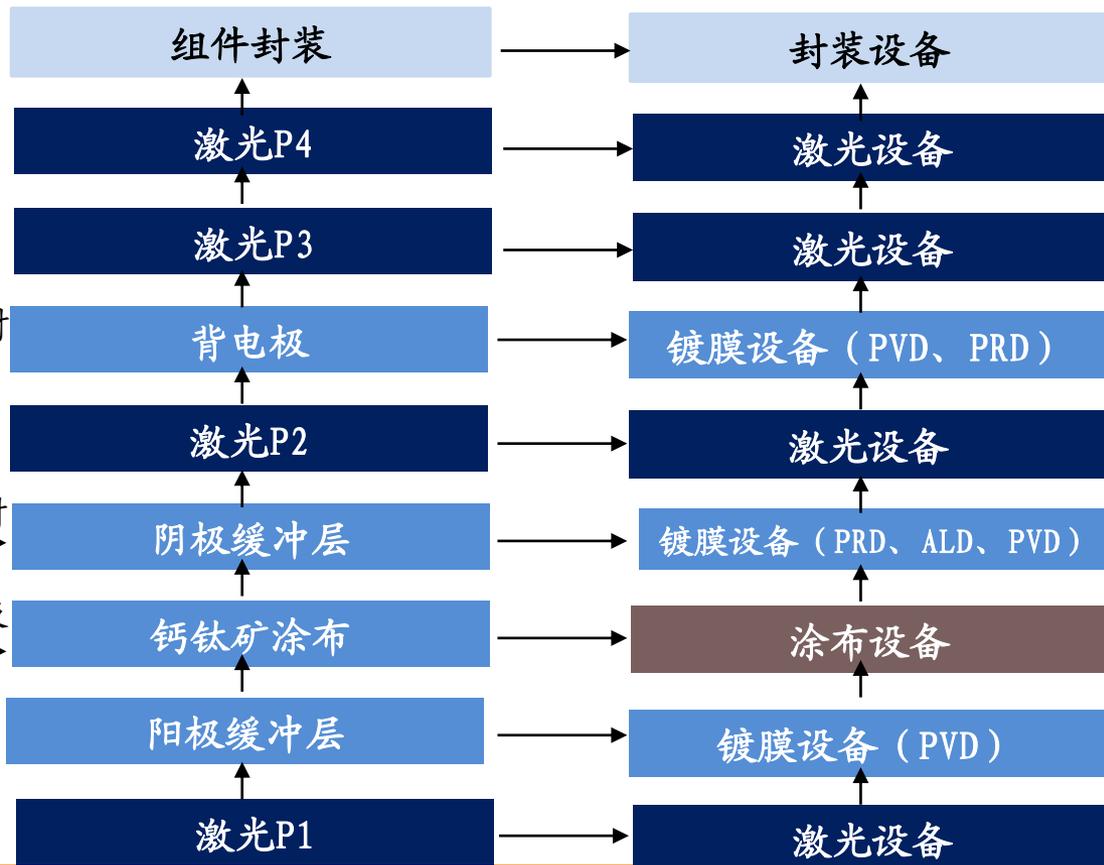
钙钛矿组件结构 (反式平面结构)



钙钛矿组件生产流程



生产线设备



镀膜设备价值最高，为未来降本主要途径

◆ **镀膜设备价值量最高，占据设备投资绝大比例。**百MW级产线的核心总投资额约1.2亿元，其中镀膜设备：激光设备：涂布设备：封装设备投资比例为50%：25%：15%：10%；生产百MW级钙钛矿需要**镀膜设备**3台（2台PVD，单价1000万/台；1台PRD，单价2000万/台）、**激光设备**3-4台(大多数4台)，总价值量1000-1500万；**涂布设备**单台1000+万/台，湿法制备需2台，钙钛矿层+钝化层合计2000万+；**封装设备**1台，单台价值1200万左右，连同后道设备价值量共3000万+。镀膜设备总投资额占比最高，未来镀膜设备国产化钙钛矿生产降本为主要途径，后续GW级设备投资预计为7-8亿元/GW。

	镀膜设备	涂布设备	激光设备	封装设备
价格(万/台)	1000-2000	1000+	250-375	1200
价值量(万)	4000+	2000+	1000-1500	1200

公司	捷佳伟创 市值：410.60亿元 晟成光伏 注册资本：4.58亿元 众能光电 注册资本：0.18亿元 科晶智达 注册资本：0.05亿元 弗斯迈 注册资本：0.10亿元	上海德沪涂膜 注册资本：0.13亿元 众能光电 注册资本：0.18亿元 大正微纳 注册资本：0.14亿元	迈为股份 市值：754.85亿元 大族激光 市值：277.64亿元 帝尔激光 市值：231.35亿元 德龙激光 市值：50.68亿元 杰普特 注册资本：0.24亿元	弗斯迈 注册资本：0.10亿元
----	--	---	---	--------------------

- ◆ 目前镀膜装备包括PVD、PRD、ALD三种，而PVD技术又分为真空蒸镀法、溅镀法和离子镀法。
- 金属对电极（背电极）：主要使用蒸镀PVD，目前已经比较成熟，还可使用PRD等离子反应设备制作；
- 电子传输层（ETL）：主流使用RPD设备；或先用RPD或ALD设备制作阻隔层，再用溅镀PVD做传输层；
- 空穴传输层（HTL）：主流使用溅射PVD，也可使用蒸镀PVD；
- 玻璃基板衬底：使用溅射PVD形成导电层，技术较为成熟。

钙钛矿组件结构 (反式平面结构)

金属对电极（背电极）

- ① 蒸镀PVD
- ② RPD

电子传输层（ETL）

- ① RPD
- ② RPD+ALD

钙钛矿层

空穴传输层（HTL）

- ① 溅射PVD
- ② 蒸镀PVD

透明导电层（顶电极）

玻璃基板衬底

- ① 溅射PVD

图表：主要镀膜方式比较

镀膜技术	PVD	RPD	ALD
沉积原理	物理气象沉积	等离子体沉积	表面饱和式反应
优点	1. 沉积速度较快； 2. 镀膜具有单一方向。	1. 离子能量低，对电池损伤小； 2. 光透过率高，电导率高。	1. 薄膜厚度较薄； 2. 均匀性好； 3. 阶梯覆盖率好。
缺点	1. 薄膜厚度较厚，精度控制差； 2. 厚度均匀性差； 3. 阶梯覆盖率差。	1. 需多个靶平行放置，影响产能； 2. 靶材利用率低，成本较高。	1. 沉积速度较慢。
应用	1. 方案成熟、成本更优； 2. 等离子轰击造成电池性能下降。	1. 电池转化效率更高； 2. 量产难度较大，生产效率较低。	1. 能满足对薄膜厚度、精度的更高要求。

- ◆ 目前国内生产镀膜设备的主要厂家有捷佳伟创、晟成光伏、科晶智达、弗斯迈、众能光电等。其中捷佳伟创及晟成光伏产业化进程最为靠前。
- 捷佳伟创：公司于2022年7月量产钙钛矿太阳能电池生产关键量产设备RPD，并顺利出货了GW级HJT电池产线设备。
- 晟成光伏：公司于2021年5月与业内钙钛矿电池领先企业开展开发战略合作，目前公司研发的钙钛矿电池团簇型多腔式蒸镀设备现已量产,并成功应用于多个客户端。

图表：PVD设备示意图



图表：镀膜设备企业产业化进展

企业名称	产业化进展
捷佳伟创	1)22年7月钙钛矿太阳能电池生产关键量产设备“立式反应式等离子体镀膜设备”(RPD)通过厂内验收,将发运客户投入生产; 2) 22年7月公司顺利出货了GW级HJT电池产线设备,并再次中标某领先公司的钙钛矿电池量产线镀膜设备订单。
晟成光伏	1) 21年初,晟成光伏投资10亿新建智能装备制造中心,项目用于新增高端光伏组件设备生产线以及建立制备异质结和钙钛矿叠层电池核心设备研发机构。2) 21年5月,晟成光伏与业内钙钛矿电池领先企业开展钙钛矿叠层电池技术开发战略合作。3) 公司研发的钙钛矿电池团簇型多腔式蒸镀设备现已量产,并成功应用于多个客户端。
科晶智达	可提供钙钛矿太阳能电池制备的全套方案,包括磁控溅射仪,蒸发镀膜,PECVD设备。
弗斯迈	提供钙钛矿组件自动化产线整体解决方案,针对钙钛矿电池组件的特殊工艺需求,为客户量身开发了核心设备及零部件,确保生产过程中的精度要求以及工艺要求。
众能光电	公司开发了一系列钙钛矿光电器件装备,包括:喷雾热解镀膜机、玻璃切割机、高精度涂布机、激光刻蚀机、真空蒸镀机、磁控溅射机、PECVD和SALD等,拥有近20项发明和实用新型专利,已通过ISO9001国际质量管理体系认证。
宏大真空	宏大真空投资2.5亿元建设的企业技术中心创新能力及真空镀膜成套装备产业化项目,集成了反应溅射和先溅射后氧化(ICP)技术,实现超硬AR+DLC+AF连续式生产。

- ◆ **钙钛矿层为钙钛矿电池的最核心层，主流方法采用狭缝涂布机制备。**目前国内钙钛矿层制备工艺主要采用狭缝涂布机进行制备，共有协鑫光电、纤纳光电、无限光电、极电光能、万度光能五家企业布局；协鑫光电、纤纳光电、无限光电、极电光能等厂商同时进行旋涂机、蒸镀PVD工艺布局；刮刀涂布、喷涂、CVD、丝网印刷机属于少数技术选择方向。
- ◆ **德沪涂膜产业化进程领先，2022年大尺寸电子级狭缝涂布设备市场市占率达70%以上。**公司目前为国内最大的钙钛矿电池制造用核心狭缝涂布设备供应商，在大尺寸电子级狭缝涂布设备领域市场占有率达70%以上，技术指标与全球同类企业产品相当；并向供应协鑫100MW钙钛矿产线供应大尺寸核心狭缝涂布设备。

图表：主要厂商涂布工艺布局

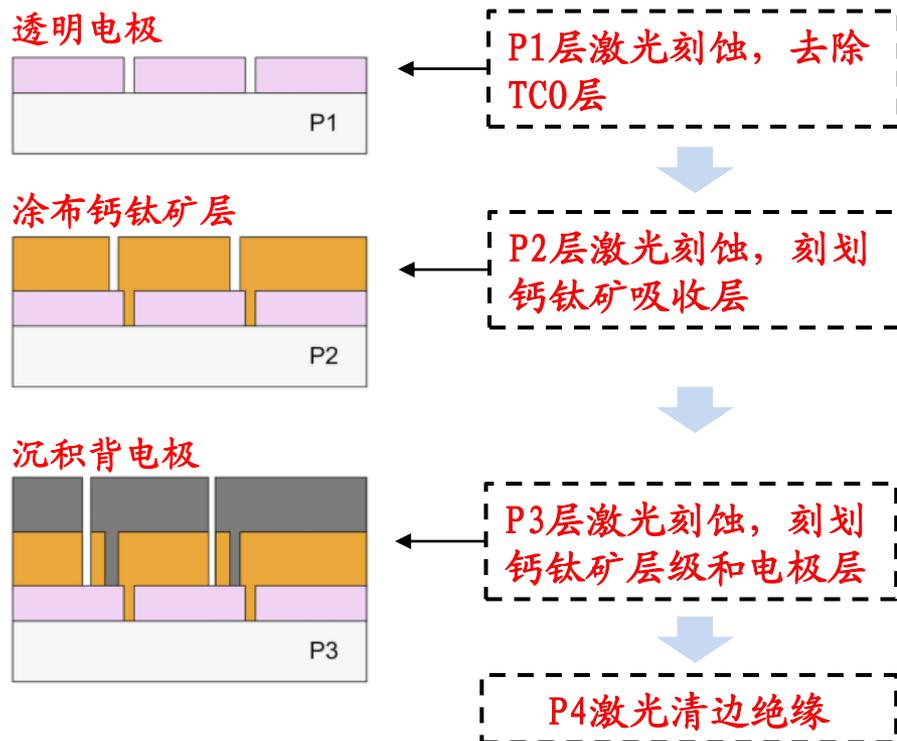
	狭缝涂布机	旋涂机	热蒸镀机	刮刀涂布机	喷涂机	CVD	丝网印刷机
协鑫光电	✓	✓	✓	✓	✓		
纤纳光电	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
无限光电	✓	✓	✓				
极电光能	✓	✓	✓			✓	
万度光能	✓						✓
众能光电							✓
大正微纳		✓					

图表：涂布企业产业化进展

企业名称	产业化进展
德沪涂膜	1) 目前为国内最大的钙钛矿电池制造用核心狭缝涂布设备供应商，在大尺寸电子级狭缝涂布设备领域市场占有率达70%以上，技术指标与全球同类企业产品相当；2) 22年三月由德沪涂膜开发的全球首套用于钙钛矿-晶硅叠层核心涂膜设备系统验收成功；3) 深耕狭缝涂布设备，供应协鑫100MW钙钛矿产线供应大尺寸核心狭缝涂布设备。
大正微纳	公司拥有Die Gate狭缝涂布机mini系列等狭缝涂布设备。
协鑫光电	公司拥有狭缝涂布机、旋涂机、热蒸镀机、刮刀涂布机、喷涂机等技术专利。
纤纳光电	公司拥有狭缝涂布机、旋涂机、热蒸镀机、刮刀涂布机、喷涂机、CVD等技术专利。
众能光电	对外销售刮涂/涂布一体机、磁控溅射、热蒸发镀、ALD和激光刻蚀机等工艺单机以及光伏组件整线近100台套。

- ◆ **激光刻线设备主要用于钙钛矿电池P1-P4层，其中对P1-P3层进行激光刻蚀，对P4层进行激光清边。** 激光设备主要用于激光划线，刻划钙钛矿吸收层、钙钛矿层及电极层，去除TCO层以及进行清边绝缘。
- ◆ **激光企业产业化进程较快。** 1) **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； 2) **迈为股份**：2021年已经交付用于单结钙钛矿电池的激光设备，未来将对单结钙钛矿会加大装备布局； 3) **德龙激光**：2020年推出针对钙钛矿薄膜太阳能生产整段设备（包括P1、P2、P3激光划线设备以及P4激光清边设备），目前设备已投入客户量产线使用，率先实现百兆瓦级规模化量产。

图表：激光设备应用示意图

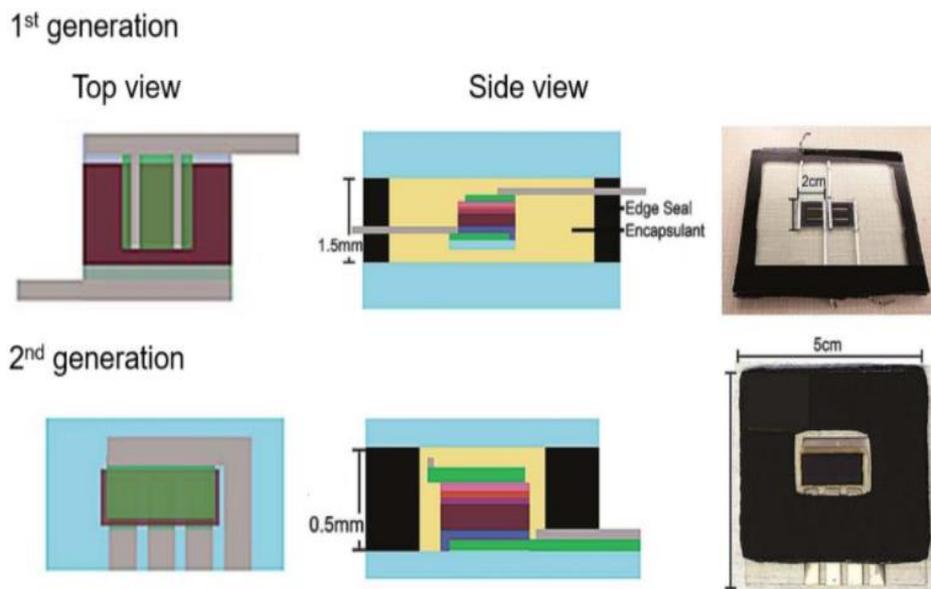


图表：激光企业产业化进展

企业名称	产业化进展
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年已经交付用于单结钙钛矿电池的激光设备，未来将对单结钙钛矿会加大装备布局。
德龙激光	2020年推出针对钙钛矿薄膜太阳能生产整段设备（包括P1、P2、P3激光划线设备以及P4激光清边设备），目前设备已投入客户量产线使用，率先实现百兆瓦级规模化量产。
众能光电	2021年底钙钛矿PVD设备出货量已达30台套。
杰普特	为江苏大正微纳科技有限公司定制的首套柔性钙钛矿膜切设备，通过验收并正式投入生产使用。
大族激光	在2022年8月表示，公司在钙钛矿技术领域自主研发的钙钛矿激光刻划设备于2015年量产销售，大尺寸整线激光刻画设备已在钙钛矿头部企业交付。

- ◆ **目前钙钛矿太阳能电池常见封装技术有两种：**1) 第一代封装技术通过使用蒸发金属喷射器和焊接金属带将电流从电池传导到外部，并密封金属带边缘；2) 第二代封装技术通过透明的氧化铟锡电极将钙钛矿电极与金属电极分开，以保证电极与印刷电路板之间有一定的横向间隙。封装面直接是ITO电极，可以更好的密封整个器件。
- ◆ **光伏组件供应商有望受益：**1) **弗斯迈：**已能为钙钛矿组件龙头厂商提供整线解决方案，主要提供精确裁覆膜设备、贴绝缘胶带机器、贴导电胶带机、汇流条贴敷机、层压机等封装设备；2) **众能光电：**拥有层压机、用于光电器件钝化的ALD设备；3) **京山轻机：**与华中科技大学合作达成合作,共同开发光伏原子镀膜装备。

图表：封装技术应用示意图



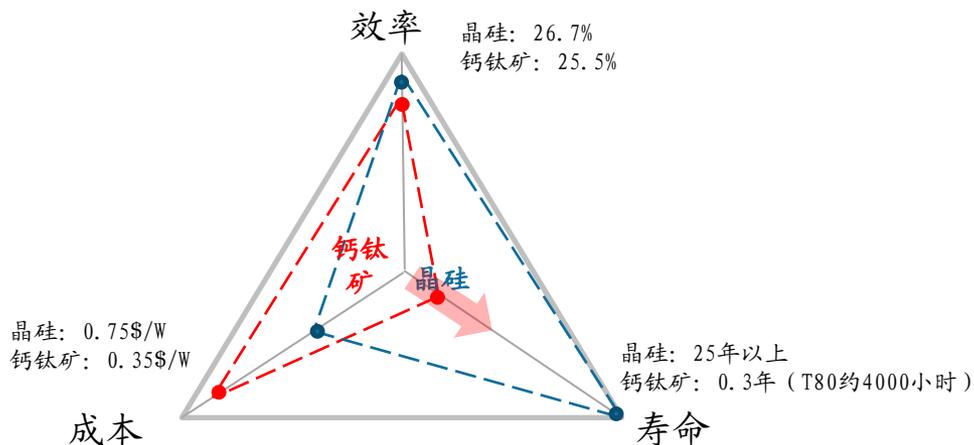
图表：封装企业产业化进展

企业名称	产业化进展
弗斯迈	为钙钛矿组件龙头工厂提供整线解决方案，主要提供精确裁覆膜设备、贴绝缘胶带机器、贴导电胶带机、汇流条贴敷机、层压机。
众能光电	公司拥有层压机、用于光电器件钝化的ALD设备。
京山轻机	公司与华中科技大学合作达成合作,共同开发光伏原子镀膜装备,将新型镀膜技术应用至光伏市场。

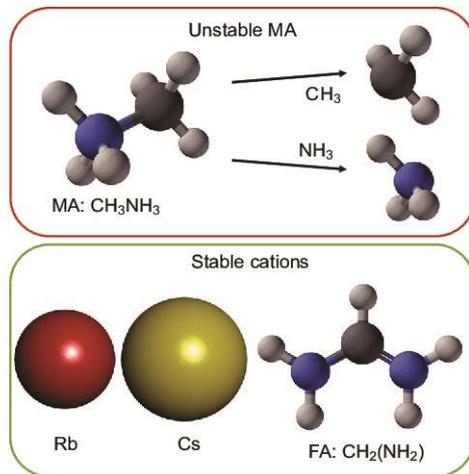
PART3 技术+政策+资金助力，产业化曙光初现

- ◆ **降本增效显著，但稳定性存在先天缺陷。** 钙钛矿电池相较晶硅电池有显著降本增效优势，但钙钛矿及电池器件各材料稳定性存在先天缺陷，容易导致组件在运行过程中寿命衰减。钙钛矿电池组件的不稳定性主要来自于钙钛矿材料自身的不稳定，以及器件各层材料之间的接触面对器件性能的影响。
- ◆ **离子晶体结构，钙钛矿材料具备不稳定性。** 钙钛矿自身的不稳定性可分为：1) 物理不稳定性，即材料本身分解能较低，离子容易发生扩散，**温度或者组分的差异会导致钙钛矿材料发生成分偏析或者相分离，影响钙钛矿层的光电性能和长期稳定性**；2) 化学不稳定性，即钙钛矿具有离子键合特性，并且组成离子均为离子势较小的“软”离子，且含有较易分解的有机铵离子，这使得钙钛矿体系形成能较小、缺陷密度较高、各组分反应活性大，**容易与环境中的水分子、空气发生反应，光照下发生相分离**，同时大量缺陷的存在也使得离子迁移很容易发生，是钙钛矿太阳能电池存在“迟滞”现象的重要原因，离子迁移的累积会造成钙钛矿晶体结构的崩塌，极大地损害器件的长期稳定性。

图：太阳能电池综合金三角，钙钛矿寿命是其短板

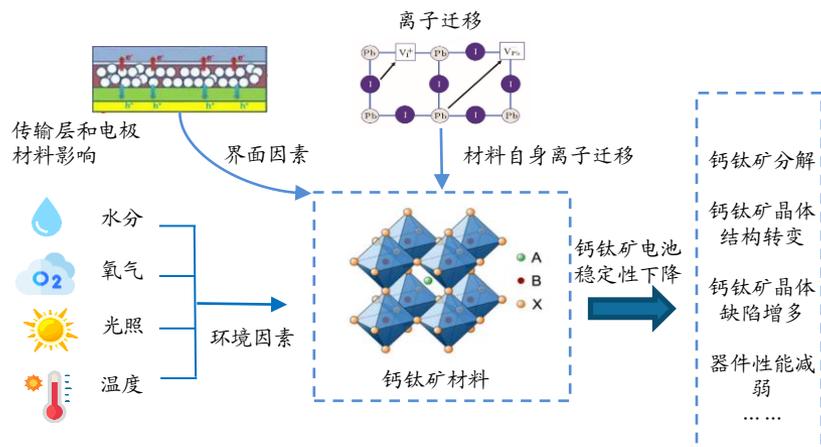


图：离子晶体结构，先天具有不稳定性



- ◆ **多层材料叠加，界面接触复合反应影响电池性能。** 除钙钛矿材料自身的光电稳定性对器件影响之外，器件各层材料之间的接触面对器件性能的影响也起到重要作用。界面的不稳定性主要存在于钙钛矿层与电子、空穴传输层之间。1) 钙钛矿层材料的**在结晶过程中晶粒间出现空隙，导致当电子、空穴材料接触时复合严重**，电池性能降低，并影响器件的稳定性。2) 电子传输层常用的是金属氧化物TiO₂，由于其光催化特性，TiO₂在光照条件下容易与接触的钙钛矿材料和氧反应导致材料分解。
- ◆ **多种途径弥补先天缺陷，助力钙钛矿产业化进程。** 由此，钙钛矿太阳能电池不稳定的原因主要可以分为吸湿性、热不稳定性、离子迁移等内在因素，和紫外线、光照等外在因素，以及电池内部界面接触带来的不稳定性，使得其在潮湿环境中极易快速降解。目前业内针对上述问题采取添加组分及稳定剂工程、改进封装材料、寻找化学性质更稳定、尺寸因子更合适的钙钛矿体系等手段来增强钙钛矿电池的稳定性。
- ◆ **进展：**已有多家公司的钙钛矿电池产品通过了IEC 61215的双85测试——在85摄氏度和85%相对湿度下连续工作1000小时的测试，这是业内著名的针对晶硅电池的严格测试。

图：多因素造成钙钛矿电池的不稳定性



图：针对稳定性问题业内提出多维解决方案

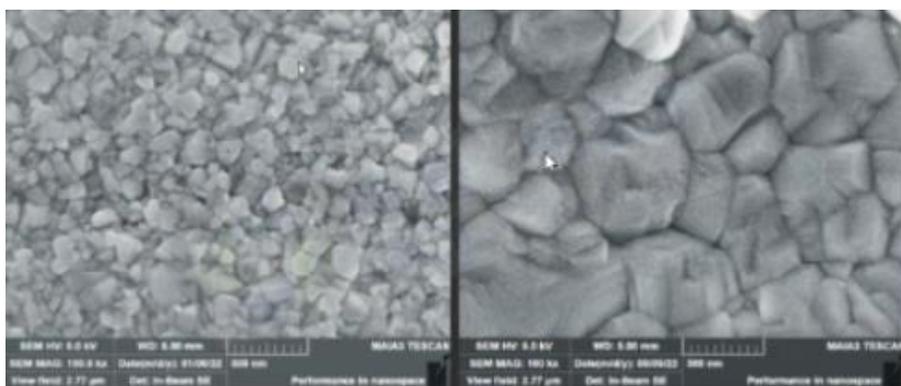
关键问题	解决方案
热稳定性和化学稳定性	全无机钙钛矿材料
水和高湿度稳定性	引进长链有机分子、发展二维钙钛矿材料、POE膜等封装工艺
空穴传输层的稳定性	采用高稳定的无机材料替代有机功能层材料
离子扩散和离子迁移	发展表面阻挡层、封装、“零维”钙钛矿材料、原位钝化
相稳定性	组分工程、添加剂工程

- ◆ **实验室效率进展迅速，产业化阶段电池效率随组件面积放大而衰减。** 目前钙钛矿电池实验室效率进展迅速，然而大多为1cm以下的小面积薄膜，产业化阶段随组件面积放大，制作工艺难度提升，电池效率呈现衰减趋势。**制备大面积钙钛矿薄膜电池，设备、工艺、配方三个环节都不可或缺。**
- ◆ **涂布均匀度需要设备与工艺精密配合。** 目前商业化主流采用狭缝涂布，生产节奏较快，涂布机自带封闭，对环境容忍程度高。**涂布工艺核心**是根据不同膜厚、溶液特性来涂抹，针对不同材料体系，其粘度、配方不同，涂布的速度以及对均匀度要求也不同。**涂布设备难点**在于：1) 涂布模头精度要求非常高，价值昂贵且多为进口。锂电池涂布机精度50微米，而狭缝涂布机（以德沪为例）精度达到20纳米；2) 泵抽取溶液、转动轴电机速度均匀；3) 调令以及集成系统、控制系统需要配合材料体系和制备工艺。
- ◆ **结晶过程控制晶体生长以提高稳定性与寿命。** 结晶环节是组件尺寸放大和大规模连续制造的最主要挑战。晶体的尺寸、均一性和贯穿率直接体现了结晶环节的工艺水平，不均匀结晶会导致电池内部电阻率升高、转换效率下降，同时晶粒越大缺陷影响越小，电池效率越高。目前各厂商结晶环节各有优势，已有方式：1) 在涂布环节进行结晶预处理、采用在线结晶方式改善后续晶体生长；2) 采用两步法，先蒸镀后涂布，利用有机组分扩散反应提高结晶质量；3) 利用自身经验储备自研及改进结晶所用设备、退火炉等，提高加热均匀度。

图：德沪狭缝涂布机

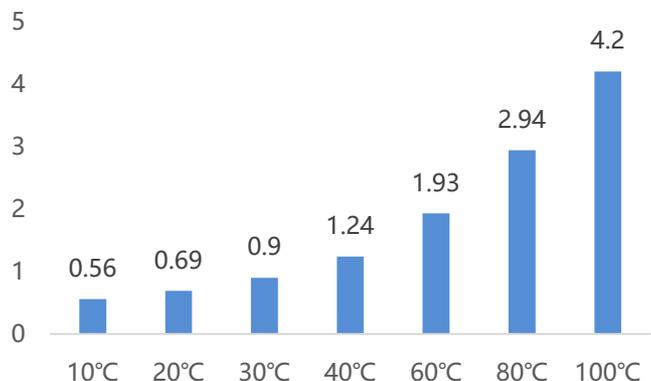


图：晶体的尺寸、均一性和贯穿率体现结晶环节的工艺水平

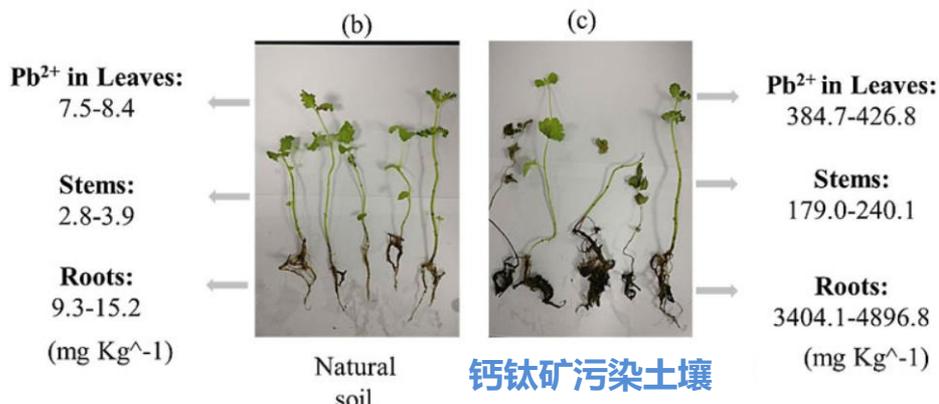


- ◆ **钙钛矿电池生命周期的铅污染主要来源**：1) 制备过程中前驱体溶液含铅。钙钛矿薄膜的厚度与前驱体溶液浓度之间存在直接关系，制造高效PSCs 需要相对高浓度 ($>1.4 \text{ M}$) 的含铅前驱体。2) 钙钛矿电池含铅，老化钙钛矿电池如未采取合适的回收方式，其中包含的碘化铅浸出进入土壤后，被植物所吸收进入食物链，相对于其他人类活动带入环境中的铅其迁移性要高10倍以上。
- ◆ **钙钛矿电池的碘化铅具有水溶性**。晶硅组件的焊带含铜箔涂铅，标准尺寸的晶硅组件里约含18 克铅，同样尺寸的钙钛矿组件含铅量不超 2 克，钙钛矿铅含量远低于晶硅。但晶硅电池组件里面主要是金属铅，在之后会变成氧化铅，在水里的溶解度不大；钙钛矿电池所包含的碘化铅具备一定水溶性 (0.69 g/L , 20°C)，如果浸出可能会造成环境和土地污染。
- ◆ **目前钙钛矿含铅不可避免**。在卤化钙钛矿中存在过量的碘化铅是钙钛矿电池效率超过20%的关键。目前无铅化是钙钛矿材料研究的重要方向之一，但到目前为止尚未找到光电效应能与铅基钙钛矿电池匹配的其他材料电池，锡基钙钛矿可以达到16%左右的效率，但目前技术仍不太成熟。且含铅钙钛矿更适合低温制备，目前仍然是钙钛矿电池商业化的优先选项。

图：碘化铅在不同温度水中的溶解度 (g/L)

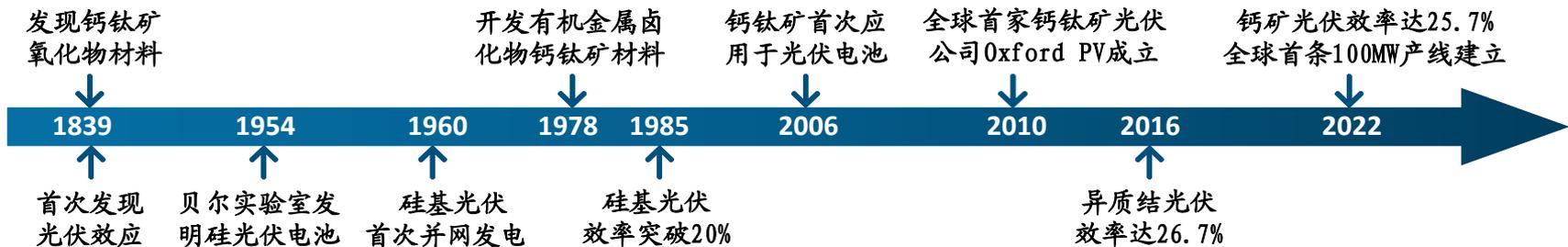


图：薄荷种植在铅基钙钛矿材料污染的土壤中铅含量显著提升

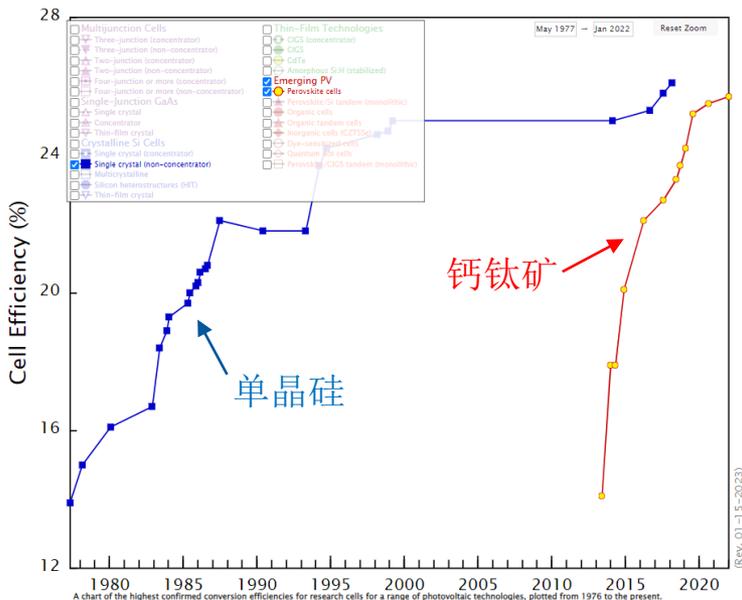


钙钛矿产业化优势：增效降本远超晶硅

◆ 从光电转化率的角度来看，钙钛矿几乎只用了10年时间走过了晶硅50年的发展路程。钙钛矿与晶硅的技术之争本质是几十万种钙钛矿材料，和一种晶硅材料的竞争。



图：钙钛矿电池和单晶硅电池实验室效率对比

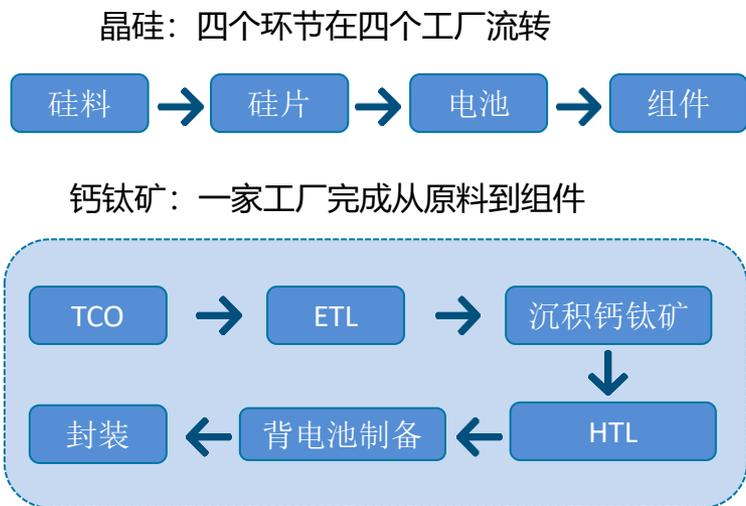


图：钙钛矿电池组件厂商效率及路线选择

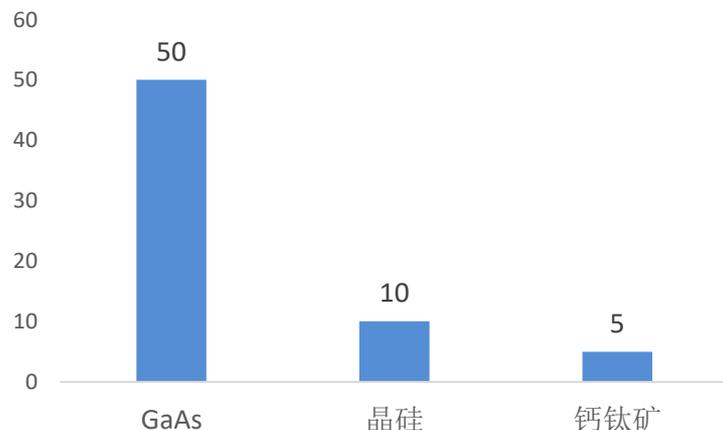
企业名	电池效率	路线选择
纤纳光电	量产效率18%	单结钙钛矿
极电光能	量产效率18%	单结钙钛矿
协鑫光电	量产效率18% (23年底)	单结钙钛矿
晶科能源	实验室效率27.6%	TOPCon-钙钛矿
黑晶光电	PERC-钙钛矿26.1%	TOPCon-钙钛矿、PERC-钙钛矿
仁烁光能	实验室效率30%	全钙钛矿叠层
华晟新能源	目标效率30%	HJT-钙钛矿
宝馨科技	目标效率32%	HJT-钙钛矿

- ◆ **一间工厂45分钟走完全部流程，钙钛矿电池生产效率显著提升。** 晶硅太阳能电池需要经过多个环节流转，硅料、硅片、电池、组件四个环节各有不同龙头厂家，整个生产过程耗时最少3天。而钙钛矿电池可以做到在一间工厂内完成全部生产过程，从原料到组件45分钟就可以走完全部流程。
- ◆ **钙钛矿电池产线建设成本约为晶硅50%。** 光伏企业投资1GW产能GaAs (Tum-key线) 需要金额约50亿元；投资1GW产能晶硅电池需要合计投资金额7.5-10亿元左右；工艺成熟条件下测算，1GW产能钙钛矿电池投资金额可降至约5亿元，约为晶硅电池投资金额的50%，GaAs (Tum-key线) 的10%。
- ◆ **钙钛矿电池生产能耗不及晶硅组件1/10。** 晶硅在拉单晶的过程中需要900°C以上的温度将硅料融化，而钙钛矿各功能层的加工温度不超过180°C，且大多数环节也无需真空条件。制造1W单晶组件的能耗大约为1.52kWh，而每瓦钙钛矿组件的生产能耗仅为0.12kWh，不及晶硅组件能耗的1/10。

图：晶硅电池及钙钛矿电池生产流程对比



图：不同类型太阳能电池单GW产能投资额（亿元）



◆ 国内外最新推进钙钛矿电池发展政策：

国家	时间	政策/会议	颁布单位	主要内容
中国	1/9/2023	《关于钙钛矿光伏电池标准专题组征集新标准项目提案的通知》	中国光伏行业协会	为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，现公开征集钙钛矿光伏电池领域新标准项目提案。 申报项目应结合钙钛矿光伏电池的特点，围绕钙钛矿光伏标准体系建设的需求，满足合法性、必要性、可行性和协调性等要求。征集范围包括但不限于：钙钛矿光伏材料、钙钛矿光伏电池制造设备和工艺、钙钛矿光伏电池及组件、钙钛矿光伏应用特殊要求等方面。
	8/29/2022	《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划》	工信部、财政部商务部等五部门联合印发	发挥重大工程牵引带动作用，鼓励具备基础和条件的地区，积极推进电力装备重点领域技术和产品推广应用。其中，太阳能装备方面， 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。
	8/18/2022	《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022-2030)》	科技部发改委工信部等九部门联合印发	2025年实现重点行业和领域低碳关键核心技术的重大突破;到2030年， 进一步研究突破一批碳中和前沿和颠覆性技术研发高效硅基光伏电池、高效稳定钙钛矿电池等技术。
	6/1/2022	《“十四五”可再生能源发展规划》	发改委、国家能源局、财政部等九部门联合印发	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 ，突破适用于可再生能源灵活制氢的电解水制氢设备关键技术，研发储备钠离子电池、液态金属电池、固态锂离子电池、金属空气电池、锂硫电池等高能量密度储能技术。
	4/2/2022	《“十四五”能源领域科技创新规划》	国家能源局科学技术部	推动钙钛矿光伏电池进行示范试验研究。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/钙矿、钙矿/钙矿等高效叠层电池制备及产业化生产技术研究。
美国	7/14/2022	拜登-哈里斯政府政策扶持钙钛矿	美国能源部	美国能源部(DOE)太阳能技术办公室(SETO)宣布了2022财年光伏研究与开发(PVRD)的资助机会，将为降低成本和供应链漏洞、 进一步开发耐用的项目提供2900万美元的资金和可回收太阳能技术，并将钙钛矿光伏(PV)技术推向商业化。 在2.900万美元中，1.000万美元将由拜登总统的两党基础设施法资助，以增加太阳能技术的再利用和回收。
日本	5/26/2021	《全球变暖对策推进法》	日本国会参议院	提出到2050年实现碳中和，到2050年将温室气体总排放量减少到零。 通过开发下一代太阳能电池(钙钛矿太阳能电池)的基础技术 ，以及为实现产品规模化的各种制造工艺技术的研究，该项目的目标是实现到2030年，与传统硅太阳能电池相同的电费为14日元/kWh或更低
韩国	9/12/2020	针对本国国内太阳能组件行业的新路线图	韩国贸易工业和能源部	韩国国内太阳能制造商和研孕机构期望基于硅和钙钛矿的串联太阳能电池技术将成为下一代光伏产品最有希望的候选者。 未来五年，约有1.900亿韩元(1.597亿美元)的公共投资将用于串联光伏技术的研究，希望到2023年达到26%的效率，到2030年达到35%的效率。

- ◆ **目前，单结钙钛矿组件产业化进展较为领先**，其中协鑫、纤纳率先完成100MW单结钙钛矿组件中试线安装，极电光能756cm²大尺寸钙钛矿光伏组件转换效率目前达到18.2%。
- ◆ **协鑫光电生产的尺寸为1m×2m的全球最大尺寸钙钛矿组件已经下线**，22年上半年，应用协鑫光电1米*2米大尺寸钙钛矿组件的Project Y钙钛矿小屋亮相张家口，目前，其投建的全球首条100MW量产线已在昆山完成厂房和主要硬件建设，计划22年投入量产，预计在工艺和产能稳定后，23年量产组件产品光电转化效率将超过18%，未来钙钛矿组件的效率预计将进一步提升至25%以上；GW级产线已在规划中，目标24年下半年落地。
- ◆ **纤纳完成1.245×0.635m尺寸组件发布，最高功率可达130W**。其主打α组件顺利通过IEC61215、IEC61730稳定性全体系认证，采用纤纳独立开发的溶液打印技术，具有功率高、稳定性好、温度系数低、热斑效应小、不易隐裂等特性；第一条GW级产线预计23年年底通线，效率预计20%。

图：协鑫钙钛矿组件



图：纤纳半透明α组件，透光度可调节



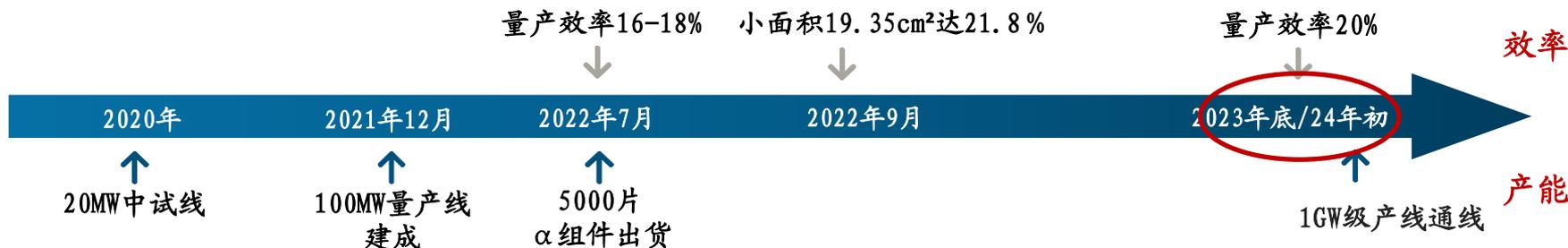
- ◆ **公司背景**：公司成立于2010年，前身为厦门惟华光能，于2016年被协鑫集团收购并成立协鑫纳米科技有限公司。董事长范斌博士学者出身，师从钙钛矿领域开拓者瑞士洛桑联邦理工学院Michael Gratzel教授。公司在钙钛矿电池研发上共有64项专利已获授权，其中发明专利17项，实用新型专利47项。
- ◆ **路线选择**：单结钙钛矿，尺寸2m×1m（大尺寸）。
- ◆ **产业化优势**：目前唯一一家产业化阶段实现大尺寸组件生产的钙钛矿厂家。
- ◆ **转换效率**：量产效率目前16%，2023年底预计达成18%以上；预计每年爬坡1~2%（绝对值），3-5年内实现20%以上电池转换效率；目标未来钙钛矿组件效率提升至25%以上。
- ◆ **产能进展**：2017年10MW中试线建成；2021年9月100MW 量产线建成（研发），尺寸1m×2m，当前处于效率提升、工艺设备改造阶段；GW级产线预计24年下半年落地。

图：协鑫光电产能规划



- ◆ **公司背景**：公司成立于2015年，是国内第一批从事钙钛矿商业化研究的机构，以及全球首家实现百兆瓦级钙钛矿组件制造和商业应用的公司。公司承担了三项科技部国家重点研发计划，三项浙江省重点研发计划和浙江省领军型创新创业团队项目，累计申报知识产权专利300多项。
- ◆ **路线选择**：单结钙钛矿，尺寸0.6m×1.2m。
- ◆ **产业化优势**：目前唯一一家实现第三代钙钛矿光伏组件（纤纳α组件）量产的公司，先发优势明显；与金晶科技达成战略合作，确保公司在TCO玻璃上的需求供应。
- ◆ **转换效率**：小面积组件效率21.8%@19.35cm²；量产转换效率：目前百兆瓦16~18%，GW级效率预计20%。
- ◆ **产能进展**：2020年3月20MW中试线落地；2021年12月100MW产线落成；2022年7月5000片α组件实现出货；预计2024年初1GW产线通线（由两条500 MW 或多条200MW、300MW产线组成）

图：纤纳光电产能规划



- ◆ **公司背景**：公司起源于长城控股集团，2018年开始钙钛矿技术研发，创始人于振瑞博士拥有35年光伏从业经验，组建了一支覆盖从实验室到产线的综合性队伍。
- ◆ **路线选择**：单结钙钛矿，尺寸0.6m×1.2m。
- ◆ **产业化优势**：大尺寸钙钛矿组件效率行业领先。
- ◆ **转换效率**：18.2%@756cm²；量产效率23年目标15~16%。
- ◆ **产线进展**：2022年12月150MW产线投产运行；2023年Q1计划开始建设GW产线；预计2026年底达到10GW产能。

图：极电光能产能规划



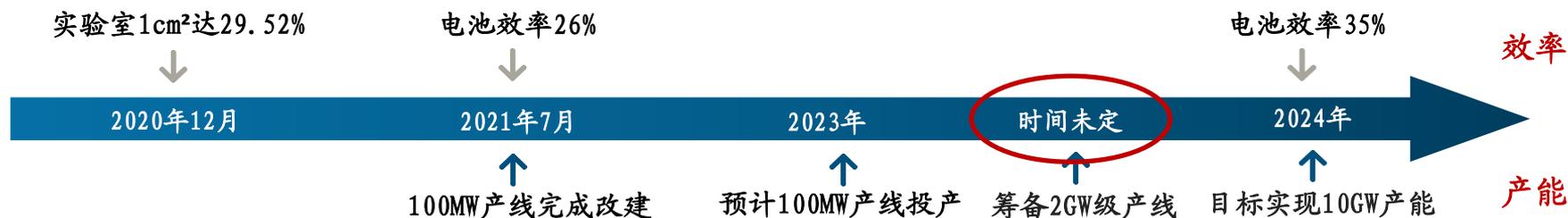
- ◆ 相较于纯钙钛矿电池路线，晶硅-钙钛矿叠层电池有望率先产业化。对于许多有硅技术积累的公司来说，晶硅叠加钙钛矿是一个既能利用原有产线和技术积累、又能降本增效的路线。相较于Topcon 叠层，钙钛矿与 HJT 叠层更合适，需要做的改造更少，同时钙钛矿/HJT 叠层电池为串联结构，输出超高电压，提高转换效率。目前HJT-钙钛矿叠层电池实验转换效率目前已达到 31.3%，已有多家硅电池厂商涉足。

图：晶硅-钙钛矿结叠层电池主流企业进展

公司	效率	进展
牛津光伏	实验室效率30%	已有100MW钙钛矿叠层电池产线
杭萧钢构	目标效率28%以上	2022 年底投产首条 100MW 晶硅薄膜+钙钛矿叠层电池中试线
华晟新能源	目标效率30%	已完成HJT-钙钛矿中试线，实现M6大面积叠层均匀制备
通威股份	实验室效率25.67%	钙钛矿实验室已经建立完成，首块钙钛矿电池有望年内下线
宝馨科技		计划 2 年内完成 100MW 钙矿或 HJT-钙钛矿叠层电池产线
曜能光电		2022 年下半年开始建设中试车间，预计 2023 年建成
隆基绿能		公布钙钛矿-异质结叠层电池专利
晶澳科技		研发中心积极研究和储备 IBC 电池、钙钛矿及叠层电池技术
天合光能	目标效率29%以上	正在开展钙钛矿/晶硅两端叠层太阳电池的设计、制备研究
东方日升	保密	正在研发中，现阶段重点在研发匹配钙钛矿的底层电池
中来股份	目标效率26%以上	涉足钙钛矿材料与 HJT-叠层电池技术开发
爱康科技		目前公司钙钛矿电池技术处于研究论证和规划阶段
黑晶光电	实验室效率26.1%	串联型钙钛矿/PERC叠层电池达到目前该类电池的最高光电转换水平
晶科能源	实验室效率27.6%	已建立大面积钙钛矿电池及组件研发线，路线是Topcon-钙钛矿叠层

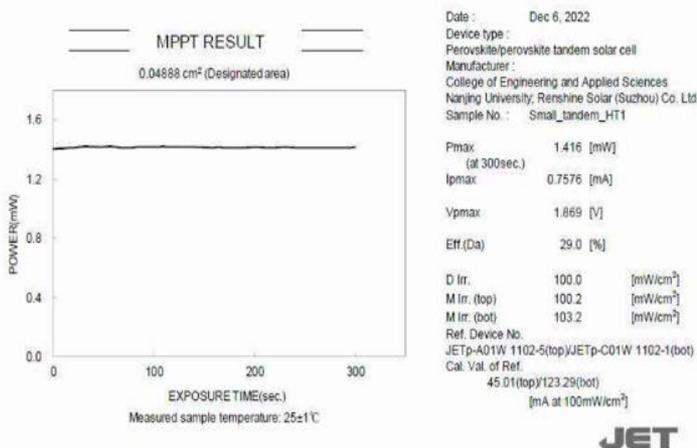
- ◆ **公司背景：**牛津光伏（Oxford PV）是英国牛津大学校办公司，成立于2010年，致力于推动欧洲光伏平价上网，自2012年开始推动钙钛矿晶硅太阳能电池的商业化。联合创始人兼首席科学官是牛津大学物理学教授Henry J. Snaith，其带领的科研团队在《Nature》、《Science》等国际著名期刊发表论文和专利600多篇，文章被引近11万，其团队关于钙钛矿器件的稳定性研究对推动钙钛矿商业化有重大影响。
- ◆ **路线选择：**钙钛矿-HJT叠层。
- ◆ **产业化优势：**实验室效率行业领先，研发团队实力强劲。
- ◆ **转换效率：**29.52%@1cm² 钙钛矿/硅叠层。
- ◆ **产线进展：**2023年100MW产线投产；计划筹备2GW产线，时间地点未定；目标24年实现10GW产能。

图：牛津光伏产能规划



- ◆ **仁烁光能150WM产线正在建设中，预计2023年Q3投产。**仁烁光能是目前钙钛矿厂家中唯一专注全钙钛矿叠层的组件厂商。12月31日，仁烁光能官微发布消息称，经日本JET第三方认证，公司研发的全钙钛矿叠层电池稳态光电转换效率达到29.0%。
- ◆ **全钙钛矿叠层优势：**1) 规避单结钙钛矿缺陷带来的电池短路，减少对放大面积后的效率和稳定性的影响，从世界纪录可以看到，随着面积的放大，叠层钙钛矿发电效率衰减的速度比单结慢；2) 解决晶硅叠钙钛矿电池中的晶硅层与钙钛矿层寿命不一致的问题；3) 制作钙钛矿层用一步法，相对晶硅叠钙钛矿降低制作工艺难度。
- ◆ **全钙钛矿叠层壁垒：**宽窄带隙配方、互连层的材料和工艺。

图：日本JET认证，全钙钛矿叠层效率达29%

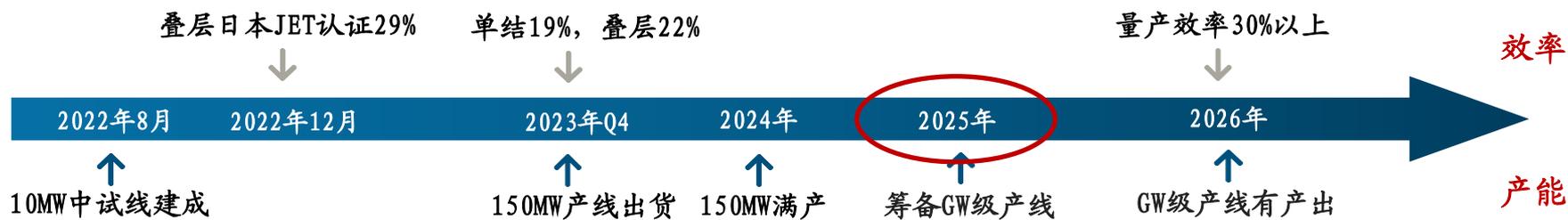


图：仁烁光能目前效率进展

技术	状态	效率
小面积叠层钙钛矿效率	已获JET认证	29%
大尺寸叠层钙钛矿组件效率	已获JET认证	24.50%
单结钙钛矿组件 (10cm*10cm)	研发突破	21%
单结钙钛矿组件 (22cm*22cm)	研发突破	19%
大面积钙钛矿组件 (1.2m*0.6cm)	2023研发计划	22%

- ◆ **公司背景**：公司由南京大学谭海仁教授创立于2021年12月，背靠南京大学、复旦大学、中科院等知名高校和科研机构，产业化管理团队为协鑫集团原核心管理层之一，技术团队在钙钛矿太阳能电池转化效率方面数次创造世界纪录。
- ◆ **路线选择**：全钙钛矿叠层（行业唯一一家），尺寸0.6m×1.2m。
- ◆ **产业化优势**：已研发成功替代晶硅窄带隙的钙钛矿层配方，成功实现全钙钛矿叠层组件，提效降本优势明显；已成功研发叠层钙钛矿互连层配方和工艺；与德沪涂膜合作成功调试适配公司材料体系及工艺配方的狭缝涂布设备，快速实现技术产业化。
- ◆ **转换效率**：1) 实验室效率：叠层21年24.7%，21年底26.4%，22年上半年28%，22年年底日本JET认证29%。2) 产业化效率：单结19%，叠层22%，工艺成熟以后可做到30%以上。
- ◆ **产线进展**：22年8月建成苏州高新区10MW叠层产线（研发为主）；常熟150MW在建，尺寸1.2*0.6，先建单结产线跑通产线后建叠层，预计23Q4出货，24年满产；25年投入GW级，预计26年有产出。

图：仁烁光能产能规划



钙钛矿电池产业化加速，各类厂商入局

◆ 钙钛矿电池各组件厂商电池路线、工艺选择及产能布局：

厂商	电池结构	制备工艺	尺寸	量产效率	量产中试线			GW级量产线	
					规模	状态	成本目标/瓦	规模	时间
极电光能	单结	钙矿层:PVD+狭缝涂布 电子和空穴传输层:PVD/RPD 电极:PVD沉积透明金属氧化物	1.2m×0.6m	量产目标15-16%	150MW	设备调试	1~1.5元	1GW级	2024年投产
								5GW	2025年投产
协鑫光电	单结	钙矿层:狭缝涂布 电子和空穴传输层:PVD 电极:TCO如氧化金等	1m*2m	目前16%，23年18% 以上，目标25%以上	100MW	完成	1元	GW级	2024年
纤纳光电	单结	钙矿层:干法共蒸CVD 电子和空穴传输层:PVD/热蒸镀 钝化层:狭缝涂布	0.6m X1.2m	目前16-18%， GW量产目标20%	100MW	完成并发货	1.3元	1GW	2024年初
无限光能	单结	/	/	目标20%以上	100MW	融资	/	/	/
众能光电	反式单结	钙矿层:干法共蒸CVD 电子和空穴传输层:PVD/热蒸镀 钝化层:狭缝涂布	1.1m X1.3m	初期目标18%		2023年底投产	/	/	/
万度光能	介孔单结	介孔层:丝网印刷 钙矿层:常温涂布 电极:丝网印刷碳电极	1.0m X1.6m	2022年16-18% 2023年18-20%	200MW	签约	1.6-1.8元 (目前)	10GW	/
合特光电(杭萧钢构)	晶硅钙钛矿叠层	/	/	/	100MW	拟建	/	/	/
牛津光伏	晶硅钙钛矿叠层	真空镀膜	/	/	/	2023年投产	/	/	/
曜能科技	晶硅钙钛矿叠层	/	/	/	中试车间	23年第投入使用	/	/	/
聆达股份	钙钛矿-HJT叠层	/	/	/	/	拟建	/	2GW	/
锦能新能源	钙钛矿-HJT叠层	/	/	目标22%以上	/	拟建	/	/	/
泰州锦能	钙钛矿-HJT叠层	/	/	目标22%以上	/	签约	/	/	/
黑晶光电	钙钛矿-PERC叠层	/	/	/	/	/	/	/	/
仁烁光能	全钙钛矿叠层	钙钛矿:狭缝涂布 电子和空穴传输层:PVD	1.2*0.6m	23年单结19%， 叠层22%	150MW	搭建中	/	GW级	2026年有产出
东方日升	叠层	/	/	/	/	拟建	/	/	/
宝馨科技	晶硅钙钛矿 四端子叠层	/	/	/	/	2024年底投产	/	/	/
宁德时代	/	/	/	/	/	搭建中	/	/	/
中国华能	/	/	3500cm2	/	/	2021年投产	/	/	/
奥联电子	/	/	/	/	120MW	2024年投产	/	2GW	5年内

◆ 钙钛矿电池各组件厂商融资情况：

企业名	日期	融资轮数	融资金额		投后估值	资方
协鑫光电	12/14/2022	B+轮	5亿元		~25亿元	淡马锡投资、红杉中国、IDG资本
	5/13/2022	B轮	5亿			腾讯
	3/9/2021	Pre-B轮	过亿			凯辉基金
	10/20/2020	A+轮	/			宁德时代
	7/15/2020	A轮	/			凯辉基金
	5/27/2020	天使轮	/			昆高新
极电光能	10/13/2021	Pre-A轮	2.2亿	7700万元	~17亿元	九智资本
				2200万元		建银国际
				7700万元		碧桂园
				2200万元		稳晟科技
				2200万元		金投资本
纤纳光电	2022/10	D轮	4亿		~40亿元	招银国际、杭开集团
	7/19/2021	战略投资	/			三峡建信
	1/25/2020	C轮	3.6亿			衢州市绿色产业引导基金 京能集团、招银国际 衢州金投、三峡建信
	9/30/2019	B轮	/			海邦投资、立晟投资
	4/30/2019	A轮	/			三峡建信
	7/2/2018	天使轮	/			余杭产业基金
	万度光能	8/25/2021	战略投资	/		20-40亿元
10/10/2016		天使轮	/		市农发投	
仁烁光能	2022/7	Pre-A轮	数亿		~10亿元	三行资本、中科创新、险峰、金浦、苏高新创投、云启

PART5 市场空间广阔，钙钛矿前景星辰大海！

- ◆ **2025年钙钛矿组件市场空间达37.5亿元，2030年达950亿元。**按照各家厂商发布的量产规划，2023年合计钙钛矿组件产能1.25GW，2025年7.4GW，预计组件市场空间约37.5亿元，2030年钙钛矿组件产能预计142GW，对应市场空间约950亿元，2022-2030CAGR达128%。

图表：钙钛矿应用市场空间测算—供给端(*2025年后产能为估计值)

厂家	2022	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
纤纳光电	0.1	0.1	1	2	5	5	8	12	18
协鑫光电	0.1	0.1	1	1	3	5	8	12	15
极电光能	0.15	0.15	1	1	3	5	8	10	12
仁烁光能		0.15	0.15	1	1	2	3	5	8
无限光能			0.1	0.1	0.1	1	2	3	5
奥联光能		0.05	0.12	0.12	1	1	2	2	4
光晶能源	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1	1	1	2	4
大正微纳			0.1	0.1	0.1	1	1	2	4
万度光能		0.2	0.2	0.2	0.2	1	1	2	4
宁德时代		0.2	0.2	1	1	3	5	8	12
牛津光伏		0.1	0.1	0.1	1	1	3	3	8
曜能科技			0.1	0.1	1	1	2	2	4
黑晶光电			0.1	0.1	1	1	2	2	4
其他	0.0	0.1	0.2	0.50	2.00	5.00	12.00	24.00	40.00
合计钙钛矿组件产能 (GW)	0.36	1.25	4.47	7.42	19.50	33.00	58.00	89.00	142.00
钙钛矿组件产量 (GW)	0.07	0.20	0.80	2.50	7.50	20.00	36.00	60.00	95.00
每瓦单价(元/W)	1.80	1.70	1.65	1.50	1.35	1.25	1.20	1.10	1.00
钙钛矿组件市场空间 (亿元)	1.30	3.40	13.20	37.50	101.25	250.00	432.00	659.75	950.00

- ◆ **钙钛矿需求高增带动设备及原材料需求空间广阔，预计2030年设备及原材料空间达239/490亿元。**若2030年钙钛矿组件产量为95GW，产能对应设备市场空间为239亿元，其中镀膜/激光/涂布/封装设备分别为120/60/36/24亿元；对应钙钛矿材料市场空间28亿元，玻璃市场空间259亿元（FTO玻璃182亿元，背板玻璃77亿元），封装材料市场空间98亿元（POE胶膜及丁基胶各49亿元），靶材市场空间105亿元，玻璃及靶材因单位成本占比较高，价值量空间较大。

图表：钙钛矿设备及材料市场空间测算—供给端(*2025年后产能为估计值)

单项	2022	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
钙钛矿产能(GW)	0.36	1.25	4.47	7.42	19.50	33.00	58.00	89.00	142.00
钙钛矿组件产量(GW)	0.07	0.20	0.80	2.50	7.50	20.00	36.00	60.00	95.00
设备单GW投资额(亿元)	12	10	9	8.5	8	7.5	6.5	5.5	4.5
①钙钛矿设备市场空间(亿元)	4.3	8.9	29.0	25.1	96.6	101.3	162.5	170.5	238.5
1) 镀膜设备	2.2	4.5	14.5	12.5	48.3	50.6	81.3	85.3	119.3
2) 激光设备	1.1	2.2	7.2	6.3	24.2	25.3	40.6	42.6	59.6
3) 涂布设备	0.6	1.3	4.3	3.8	14.5	15.2	24.4	25.6	35.8
4) 封装设备	0.4	0.9	2.9	2.5	9.7	10.1	16.3	17.1	23.9
②钙钛矿层市场空间(亿元)	0.0	0.1	0.4	1.1	3.0	7.4	12.7	19.5	28.0
③玻璃及其他封装材料市场空间(亿元)	0.4	1.2	5.0	14.1	38.1	94.0	162.5	248.1	357.3
1) 玻璃市场空间	0.3	0.8	3.6	10.2	27.6	68.2	117.9	180.0	259.2
FTO玻璃	0.2	0.6	2.5	7.2	19.4	47.9	82.8	126.5	182.2
背板玻璃	0.1	0.3	1.1	3.0	8.2	20.3	35.0	53.5	77.1
2) 封装材料(POE胶膜及丁基胶, 亿元)	0.1	0.3	1.4	3.9	10.5	25.8	44.6	68.1	98.1
POE胶膜	0.1	0.2	0.7	1.9	5.2	12.9	22.3	34.1	49.0
丁基胶	0.1	0.2	0.7	1.9	5.2	12.9	22.3	34.1	49.0
④靶材市场空间(亿元)	0.1	0.4	1.5	4.1	11.2	27.7	47.8	73.0	105.1

- ◆ **BIPV为光伏未来应用的重要场景：**光伏建筑一体化（BIPV）为将光伏组件集成到建筑上的分布式发电系统，主要应用场景包括屋顶、幕墙、窗户、围栏等，其中立面和光伏屋顶为主要应用方向。
- ◆ **钙钛矿为BIPV应用的理想材料：**1) 钙钛矿组件更轻薄、柔韧性好更好，可塑性高，可以任意弯曲，在BIPV中应用更广泛；2) 相较于晶硅电池透光性更强，可以满足建筑物对于不同光照强度的要求；3) 钙钛矿组件具有颜色可调的特点，可以根据需求生产出不同颜色的组件，美观性更强；4) 在阴天和人造光环境下也有较高的转换效率，发电较为稳定。

图表：BIPV应用示意图

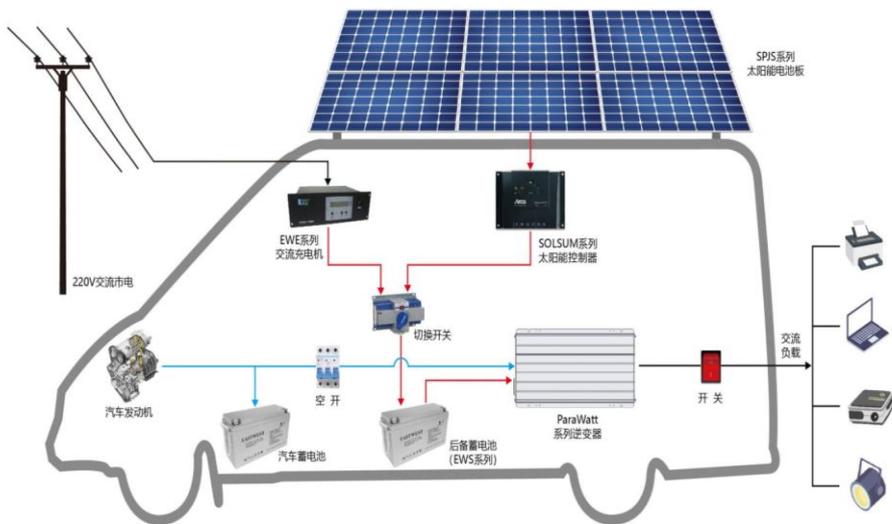


图表：BIPV屋顶与立面示意图



- ◆ **CIPV目前尚处于起步阶段**：车载光伏发电系统（CIPV）为在汽车上安装整套的离网光伏发电系统，该领域目前处于起步阶段，仅有Toyota Prius Prime、Nissan Leaf、Karma Fischer Revero、Hyundai Sonata和Ioniq 5配备了光伏集成全景天窗；同时初创公司EV Solar Kits正在为特斯拉开发车载光伏设计方案，可以安装在Model 3和Model Y汽车的车顶上，成本为5000元，加装后可让汽车每天多跑100公里。

图表：CIPV应用示意图



图表：特斯拉车载光伏示意图



- ◆ **技术逐渐成熟有助于推进大规模应用，未来钙钛矿应用空间广阔。**钙钛矿效率上限高，光学及电学性能，且成本约为传统光伏的5%，大规模应用后有望推进光伏平价上网，但因其稳定性较差、寿命较低，大规模应用存在技术难度。2023年2月15日，衢江区钙钛矿集中式光伏电站一期项目在衢州市衢江区开工，装机容量12MW,计划投资6000万元，是全球首个钙钛矿地面光伏电站，产业化应用曙光初现，钙钛矿地面电站应用空间广阔。

图表：衢州光伏发电项目



图表：衢州钙钛矿集中式光伏电站一期开工



- ◆ **光伏装机需求向好叠加渗透率高增，钙钛矿组件市场空间广阔。**假设2023/2025/2030年全球光伏装机分别为375/585/1319GW，组件在地面电站渗透率由2023年的0%逐步提升至2030年的3.0%，2025/2030年全球地面电站钙钛矿需求分别为2.3/25.0GW；在分布式中的渗透率由2023年的0.2%提升至2030年的9.4%，2025/2030全球分布式钙钛矿需求分别2.3/70.5GW,2025/2030整体市场空间为2.6/95.5GW, 2022-2030CAGR达146%，市场空间广阔。

图表：钙钛矿组件在地面电站及分布式空间测算

	2021	2022	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
全球光伏装机 (GW)	170	256	375	480	585	698	825	968	1130	1319
地面电站占比 (%)	56%	49%	54%	54%	54%	53%	53%	53%	53%	53%
地面电站装机 (GW)	95.25	124.62	201.66	260.95	315.33	371.73	436.07	509.81	595.12	694.11
组件容配比	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
地面电站组件需求 (GW)	114.30	149.55	241.99	313.15	378.40	446.08	523.29	611.77	714.14	832.93
钙钛矿组件渗透率 (%)	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.1%	0.5%	0.8%	1.5%	2.0%	3.0%
钙钛矿需求—地面电站 (GW)	0.00	0.00	0.00	0.03	0.30	2.23	4.19	9.18	14.28	24.99
分布式占比 (%)	44%	51%	46%	46%	46%	47%	47%	47%	47%	47%
分布式装机 (GW)	75.08	131.47	173.45	218.98	270.02	326.35	388.66	458.67	535.12	624.86
组件容配比	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
分布式组件需求 (GW)	90.10	157.76	208.14	262.78	324.02	391.62	466.40	550.41	642.15	749.83
钙钛矿组件渗透率 (%)	0.01%	0.05%	0.10%	0.30%	0.70%	1.40%	3.90%	5.00%	7.50%	9.40%
钙钛矿需求-分布式 (GW)	0.01	0.07	0.20	0.80	2.27	5.48	18.19	27.52	48.16	70.48
钙钛矿渗透率-合计 (%)	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%	3%	5%	6%
钙钛矿需求-合计 (GW)	0.01	0.07	0.20	0.83	2.57	7.71	22.38	36.70	62.44	95.47

PART6 投资建议

- ◆ **投资建议：**钙钛矿效率潜力高成本低、23年GW级招标或出现，降本增效促进下，钙钛矿有望成为下一代光伏电池技术方向，重点关注：1) 钙钛矿组件：隆基绿能、天合光能、晶澳科技、晶科能源、通威股份，关注东方日升、杭萧钢构、奥联电子等；2) 设备：关注捷佳伟创、迈为股份、京山轻机、大族激光、帝尔激光、德龙激光、杰普特、奥来德、德沪涂膜（未上市）；3) 封装：福斯特、海优新材，关注天津新材、激智科技；4) TCO玻璃：关注金晶科技、耀皮玻璃。5) 关注钙钛矿领先创业公司：纤纳光电、协鑫光电、仁烁光能、极电光能、耀能科技、黑晶光电等（未上市）。

图表：重点公司估值表（截至2023年02月05日）

	证券代码	名称	总市值 (亿元)	股价	归母净利润 (亿元)			PE			评级	总股本 (亿股)	来源
					2022E	2023E	2024E	2022E	2023E	2024E			
钙钛矿组件	601012.SH	隆基绿能	3,692	49	150.4	190.8	230.4	25	19	16	买入	75.82	东吴预测
	688599.SH	天合光能	1,505	69	37.5	71.4	96.5	40	21	16	买入	21.69	东吴预测
	002459.SZ	晶澳科技	1,532	65	52.9	80.8	106	29	19	14	买入	23.55	东吴预测
	688223.SH	晶科能源	1,580	16	28.3	65.4	89.9	56	24	18	买入	100	东吴预测
	600438.SH	通威股份	1,915	43	262.3	175.5	161.2	7	11	12	买入	45.02	东吴预测
	300118.SZ	东方日升	295	33	10.91	16.11	21.96	27	18	13	未评级	8.92	Wind
	600477.SH	杭萧钢构	139	6	4.65	5.57	6.63	30	25	21	未评级	23.69	Wind
钙钛矿设备	300724.SZ	捷佳伟创	405	116	9.63	12.63	16.13	42	32	25	增持	3.48	东吴预测
	300751.SZ	迈为股份	731	420	9.8	19.13	28.42	75	38	26	买入	1.74	东吴预测
	300585.SZ	奥联电子	60	35	0.23	0.29	0.92	257	205	65	未评级	1.71	Wind
	000821.SZ	京山轻机	156	25	2.85	4.31	5.57	55	36	28	未评级	6.23	Wind
	002008.SZ	大族激光	303	29	14.39	19.9	26.59	21	15	11	买入	10.52	东吴预测
	300776.SZ	帝尔激光	248	145	5.07	7.34	10.35	49	34	24	未评级	1.71	Wind
	688170.SH	德龙激光	65	63	0.8	1.28	1.88	82	51	35	未评级	1.03	Wind
	688025.SH	杰普特	58	62	0.89	1.97	2.81	65	29	21	未评级	0.94	Wind
	688378.SH	奥来德	64	63	1.8	2.68	3.88	36	24	17	未评级	1.03	Wind
POE封装材料	603806.SH	福斯特	1,013	76	24.8	35.6	42.4	41	28	24	买入	13.32	东吴预测
	688680.SH	海优新材	192	229	0.8	8.1	10.9	229	24	18	买入	0.84	东吴预测
	603330.SH	天津新材	67	16	0.37	2.63	3.61	181	26	19	未评级	4.33	Wind
	300566.SZ	激智科技	69	26	0.56	2.27	3.34	123	30	21	未评级	2.64	Wind
TCO玻璃	600586.SH	金晶科技	173	12	5.62	9.38	12.54	31	18	14	未评级	14.29	Wind
	600819.SH	耀皮玻璃	73	8	-	-	-	-	-	-	未评级	9.35	Wind

- ◆ **1) 晶硅电池价格下降，钙钛矿电池成本优势下降。** 目前晶硅电池产业链从硅料到组件价格均有不同程度下降，钙钛矿在工艺改进、量产线建设阶段，设备国产化中，对比晶硅电池成本优势或不达预期。
- ◆ **2) 应用阶段组件效率、寿命不及预期。** 多家钙钛矿组件厂商通过IEC 61215 双85测试，但未尚实现大量出货，未有大规模实际应用，应用阶段组件效率、寿命或不及预期。
- ◆ **3) 产品销量低于预期。** 我们认为钙钛矿前期主要市场为BIPV、CIPV 薄膜电池领域，如在这两个领域销量不达预期，钙钛矿电池或面临扩产速度减缓。

东吴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。

本研究报告仅供东吴证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议，本公司不对任何人因使用本报告中的内容所导致的损失负任何责任。在法律许可的情况下，东吴证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

市场有风险，投资需谨慎。本报告是基于本公司分析师认为可靠且已公开的信息，本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，也不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。

本报告的版权归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。如引用、刊发、转载，需征得东吴证券研究所同意，并注明出处为东吴证券研究所，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。

东吴证券投资评级标准：

公司投资评级：

买入：预期未来6个月个股涨跌幅相对大盘在15%以上；

增持：预期未来6个月个股涨跌幅相对大盘介于5%与15%之间；

中性：预期未来6个月个股涨跌幅相对大盘介于-5%与5%之间；

减持：预期未来6个月个股涨跌幅相对大盘介于-15%与-5%之间；

卖出：预期未来6个月个股涨跌幅相对大盘在-15%以下。

行业投资评级：

增持：预期未来6个月内，行业指数相对强于大盘5%以上；

中性：预期未来6个月内，行业指数相对大盘-5%与5%；

减持：预期未来6个月内，行业指数相对弱于大盘5%以上。

东吴证券研究所
苏州工业园区星阳街5号
邮政编码：215021
传真：（0512）62938527
公司网址：<http://www.dwzq.com.cn>

东吴证券财富家园