

# 钙钛矿太阳能电池研究总论（光伏设备专题策略）： 朝阳之光，与时并明

---

安信证券研究中心 机械团队

分析师 郭倩倩

SAC执业证书编号：S1450521120004

分析师 范云浩

SAC执业证书编号：S1450521120007

2023/2/4



# 核心观点

在未来的光伏电池技术路线中，钙钛矿是非常具备前景的候选材料。钙钛矿太阳电池与传统晶硅太阳电池的差异主要体现在：①更加优异的本征光电性质，理论极限效率更高；②吸光层材料（钙钛矿层）与基层（如TCO）相分离；③载流子的传输/阻挡更加依赖不同功能层材料之间的能级排布。与此同时，以典型的有机无机杂化钙钛矿电池为例，常见的组成元素如碳、氢、氮、铅、碘等在地球上都非常常见。优良的光电特性与物质丰度是钙钛矿电池长期实现商业化最基础的先决条件。

我们认为钙钛矿太阳电池的商业化本质如下：①在未来光伏产业降本之路上的必然尝试。就单结电池而论，随着人们对光电材料探索的深入，在目前已知已试范围内要么面临效率瓶颈，要么商业化逻辑证伪。钙钛矿范畴几乎是唯一值得探索方向，长期产业趋势不必担忧。②从晶硅到钙钛矿电池，行业属性从大宗工业品转向精细化学品，可通过吸光层材料组分的调控在材料端就会实现差异化。③工艺简洁带来产业链自然缩短，没有传统意义上的电池片环节，产业边界与工艺边界模糊化，前后道工艺天然一体化在材料选择与工艺落地方面需要兼顾问题较多，对组件制造及设备企业而言“易会难精”。④就工艺体系而言迎来光伏制造面板化，未来或有大量企业从面板行业跨界进入钙钛矿太阳电池领域。

# 核心观点

从商业化进程来看：我们认为商业化初期，钙钛矿/晶硅叠层与钙钛矿单结电池双线并举，未来钙钛矿/晶硅叠层主要的目标市场是地面电站，而钙钛矿单结电池主要针对的目标市场是BIPV、CIPV及消费级小组件等，挤压其他小众薄膜电池的市场空间。从商业化时点来看，钙钛矿/晶硅叠层可能领先于钙钛矿单结，主要系：①光伏应用端主要场景如地面电站回收周期长，是低风险偏好行业，钙钛矿电池尚缺乏产品可靠性背书，需要站在晶硅的肩膀之上慢慢积累成熟度再反客为主。②从实证数据来看，钙钛矿电池高效率、大面积、高可靠性三者之间尚未完全相兼而善，钙钛矿/晶硅叠层可解决大面积问题，且工艺成熟后不会牺牲晶硅绒面。③钙钛矿/晶硅叠层的理论效率（约42.5%）高于钙钛矿单结（约33%），叠层路线将延续晶硅电池生命周期，晶硅电池厂商面临瓶颈后会自发转向钙钛矿/晶硅叠层，尤其是HJT技术路线。

从投资主线来看：①基于产业化可行性看好钙钛矿/晶硅叠层确定性趋势，建议关注对薄膜工艺理解深入的迈为股份，捷佳伟创，微导纳米等。②基于光伏制造面板化与钙钛矿电池先有再优过程中的工艺转型，建议关注奥来德、京山轻机等。③基于吸光层材料与基层材料分离带来电池片成本结构变化，推荐TCO玻璃环节，及靶材相关标的。④基于钙钛矿晶体对水氧光热敏感，封装的功能性意义凸显，建议关注组件层压设备及POE材料相关标的。⑤基于“激光法”实现钙钛矿串联结构，建议关注帝尔激光、德龙激光等激光设备公司。

**风险提示：**钙钛矿商业化进程不及预期；钙钛矿电池领域市场竞争加剧；钙钛矿电池部分原理性及工程性问题涉及专业及专业未知领域，市场研究层面可能有认知偏差；为方便广大投资者理解本研究语言表述不符合学术规范

# 目录 / CONTENTS

01

太阳电池分类及钙钛矿电池与晶硅电池对比

02

钙钛矿太阳电池的商业化本质

03

钙钛矿太阳电池制备工艺及设备

04

钙钛矿太阳电池商业化进展与产业化难题

05

钙钛矿太阳电池行业投资主线及风险提示

01

# 太阳电池分类及 钙钛矿电池与晶硅电池对比

## 1.1 太阳电池分类——钙钛矿太阳电池属于新型薄膜太阳电池

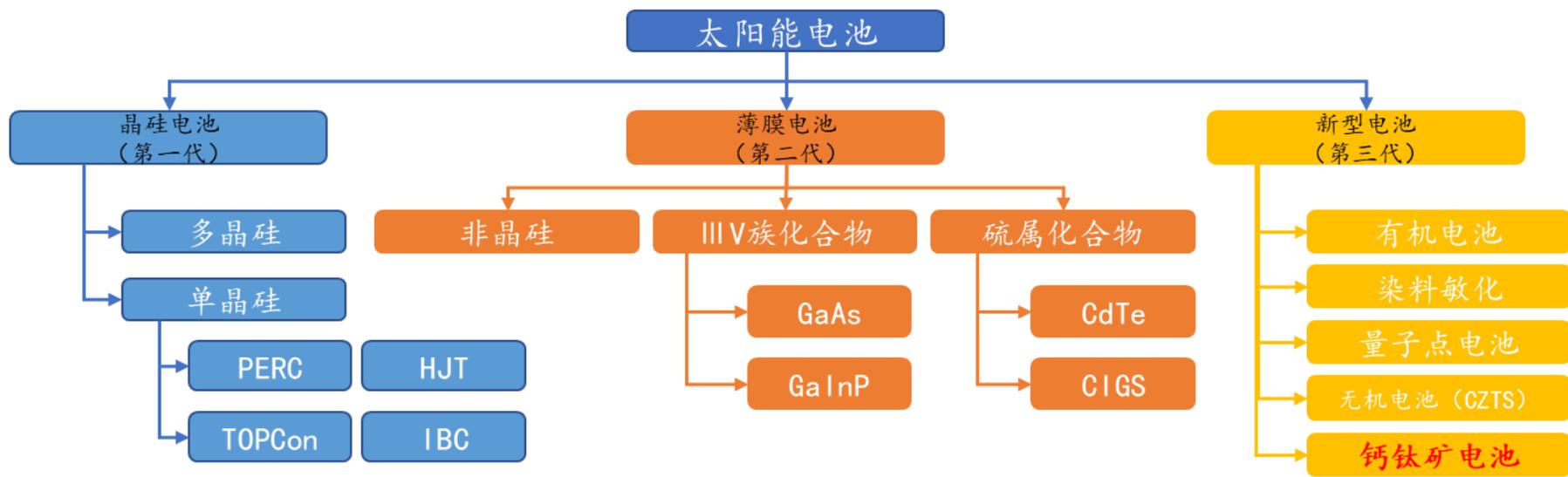
太阳电池按照材料类型来说，可以大致分为三个技术代际：

(1) **第一代硅基太阳电池 (Crystalline Silicon)**：主要指单晶硅、多晶硅、以及非晶硅作为吸光层的太阳电池。

(2) **第二代多元化合物薄膜太阳电池 (Thin Film)**：主要包括砷化镓 (GaAs)、磷化铟 (InP)、铜铟镓硒 (CIGS)、碲化镉 (CdTe) 太阳电池。

(3) **第三代新型太阳电池 (Organic & Nanomaterials)**：主要包括钙钛矿太阳电池，染料敏化太阳电池，有机太阳电池、量子点太阳电池。

图表：太阳电池按照材料类型可分为硅基电池、多元化合物薄膜电池、新型太阳电池 (补充)



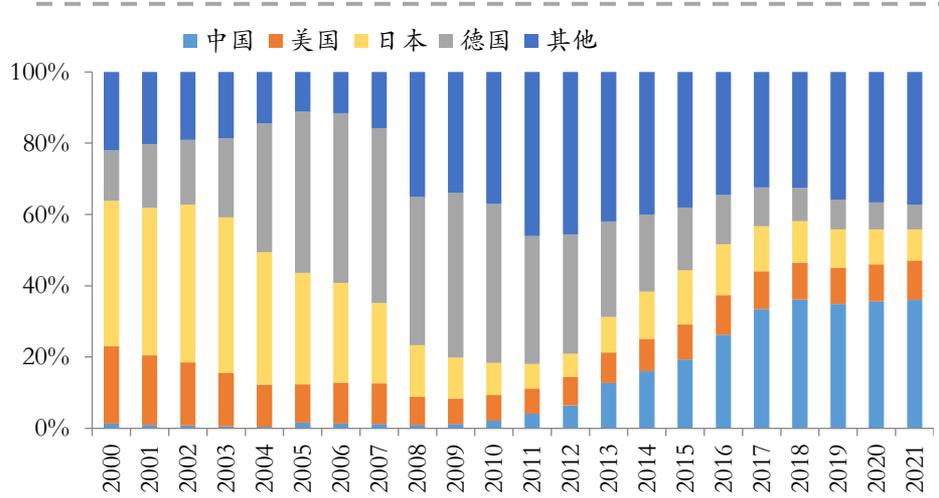
资料来源：《光伏电池原理》，安信证券研究中心整理绘制

## 1.2 晶硅电池—虽不完美但“生逢其时”

### 晶硅电池发展历程

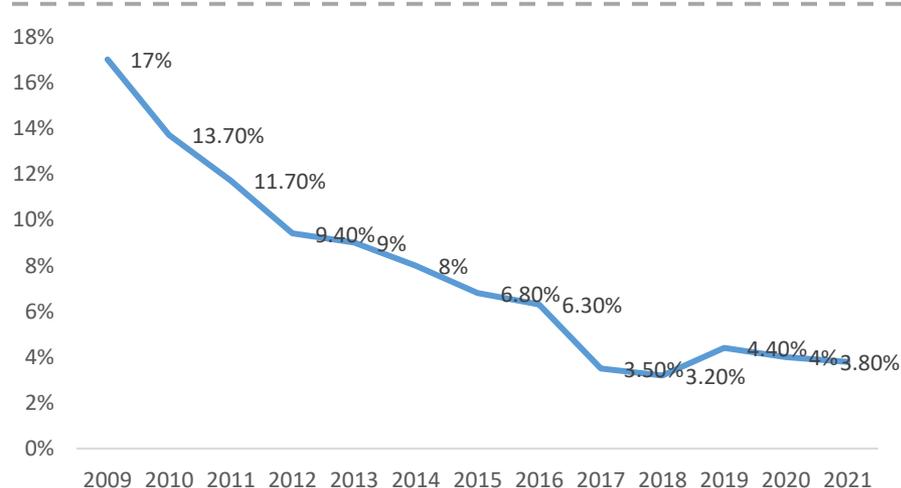
- ◆ 1953年Bell实验室首次制备出具有实际应用价值的晶硅电池；
- ◆ 1958年晶硅电池首次在空间应用（美国先锋1号）；
- ◆ 1959年美国Hoffman Electronics的晶硅电池效率突破10%；
- ◆ 1960年初西门子法制备多晶硅基本实现产业化，为太阳电池大规模地面的应用奠定了材料基础；
- ◆ 1970年初光伏在地面场景得到应用，70年代末地面太阳电池产量已远超过空间电池；
- ◆ 1985年澳大利亚新南威尔士大学的晶硅太阳电池实验室效率突破 20%，1998年达到24.7%；
- ◆ 2004年德国实施修正的《可再生能源法》（即著名的“施罗德法案”），使得光伏产业在整个欧洲获得大规模商业化应用的机会，欧洲在主导光伏装机应用后市场对光伏电池技术逐渐“独尊晶硅”，即晶硅电池的发展有非常明显的时代底色。

图表：全球光伏装机量区域分布情况，2004年之前日本主导装机应用



资料来源：IRENA，安信证券研究中心

图表：薄膜电池市占率自2004年后持续受到晶硅电池的挤压



资料来源：CPIA，安信证券研究中心

## 1.2 晶硅电池的转换效率已然逐渐逼近其物理极限，开始借鉴薄膜电池思路

由于能量小于半导体带隙的光子不能发生本征吸收，Shockley和Queisser提出了太阳电池的极限效率与半导体带隙之间的计算关系，这个极限被称为Shockley-Queisser (SQ) 极限。对地面光谱而言，晶硅太阳电池的理论极限效率大概在29.43%

图表：2018年ISFH对各类太阳电池的理论效率进行了测算

Hole-selective contacts	S <sub>1000kmax</sub> [%]	J <sub>sc,lim</sub> [%]	η <sub>0,lim</sub> [%]	Electron-selective contacts											
				P-diffused n [57]	a-Si:H(i) /a-Si:H(n) [58]	th-SiO <sub>2</sub> / poly-Si(n) PECVD [84]	th-SiO <sub>2</sub> / poly-Si(n) LPCVD [59]	chem-SiO <sub>2</sub> / poly-Si(n) LPCVD [60]	SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> [133]	MgO <sub>x</sub> [134]					
Hole-selective contacts	Al-doped p [61]	11.7	56	12.8	97	12.8	23	12.9	8.4	13.0	1.2	12.5	12	11.9	4.1
		3.5	24.5	1.3	26.8	1.2	26.9	1.2	27.1	1.1	27.1	1.6	26.3	2.9	24.9
	a-Si:H(i) /a-Si:H(p) [58]	11.8	51	13.2	76	13.3	18	13.5	6.6	13.5	0.90	12.8	9.7	12.0	3.6
		46.4	24.7	152	27.5	144	27.7	134	27.9	133	28.0	190	26.8	379	25.1
	chem-SiO <sub>2</sub> / SiC /p-Si [85]	11.9	47	13.6	64	13.8	15	14.2	5.6	14.2	0.80	13.1	8.2	12.1	3.3
		21	24.9	6.4	28.1	6.1	28.3	5.8	28.7	5.7	28.7	8.0	27.3	17	25.4
	chem-SiO <sub>2</sub> / SiC (p) [88]	11.9	47	13.5	66	13.7	16	14.0	5.8	14.1	0.8	13.0	8.4	12.1	3.3
		37	24.9	11	28.0	11	28.2	10	28.5	10	28.6	14	27.2	30	25.3
	a-Si:H(i) /MoO <sub>x</sub> [128]	11.7	59	12.6	107	12.7	26	12.8	9.4	12.8	1.3	12.4	13	11.8	4.4
		242	24.4	95.9	26.5	91.5	26.6	85.6	26.8	84.9	26.8	115	26.0	203	24.7
MoO <sub>x</sub> [139]	11.6	67	12.3	139	12.4	34	12.4	12	12.4	1.8	12.2	16	11.7	5.0	
	14	24.1	6.2	25.9	6.0	26.0	5.7	26.1	5.6	26.1	7.2	25.5	12	24.4	
PEDOT /PSS [112]	11.6	65	12.4	133	12.4	32	12.5	12	12.5	1.7	12.2	16	11.7	4.9	
	47	24.1	21	26.0	20	26.1	19	26.2	19	26.2	25	25.6	40	24.5	

HJT电池理论效率最高：27.5%

n型扩散发射结单面Topcon电池理论效率最高：24.9%

P型Al扩散局域发射结单面Topcon电池理论效率最高：27.1%

双面多晶硅钝化Topcon电池最高：28.7%

2018年，德国哈梅林研究所（ISFH）在瑞士的《太阳能材料和太阳电池》学报上，对各种电池片的极限效率进行了测算，结论：

单面poly钝化的TOPCon的效率极限是27.1%。

双面poly钝化的TOPCon极限是28.7%（把背光面的氧化硅和高掺杂的多晶硅复合钝化层同时搬到前表面，Polo架构）

HJT（α-Si）：极限效率27.5%，论文发表较早是以非晶硅测算的

**HJT（μc-Si）：效率极限约28.5%**

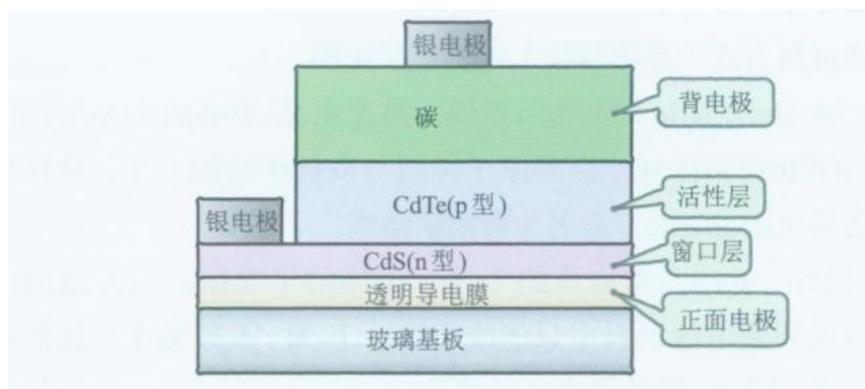
在资本市场关注度颇高的HJT电池目前在实验室效率层面取得了晶硅电池之最。虽然HJT是晶硅电池，但其核心工艺主要采用薄膜工艺（CVD、PVD），借鉴了新型薄膜电池的结构特点，是承前启后的一代光伏电池片工艺技术。

资料来源：《HJT与TOPCon的竞争与融合》—王文静，安信证券研究中心

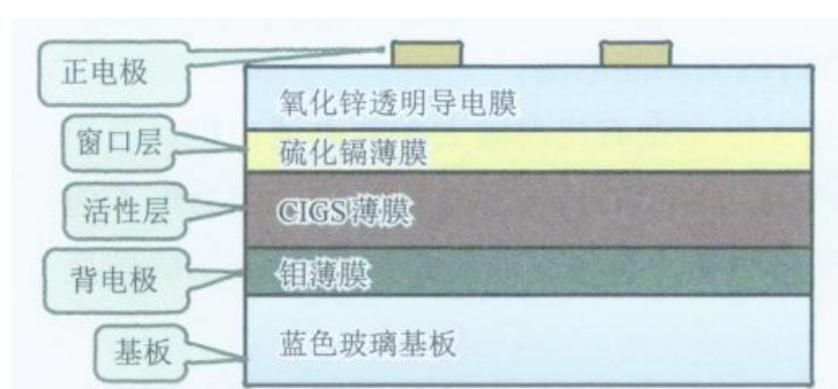
### 1.3 多元化合物薄膜电池—因含稀有元素或造价高昂而较难大范围商业化

相比于硅属于间接跃迁型半导体材料，使用III-V族化合物太阳能电池、碲化镉（CdTe）、铜铟镓硒（CIGS）等直接跃迁型半导体吸光能力更强。硅属于间接跃迁型半导体，吸收光的能力比较弱，光吸收需要上百 $\mu\text{m}$ 的衬底厚度，其薄片化程度有其物理瓶颈（通俗来讲厚度为几 $\mu\text{m}$ 时光就直接透过去了，没有被吸收）。而上述化合物太阳能电池则属于直接跃迁型半导体材料，在玻璃、塑料和不锈钢等基底上沉积薄膜光伏材料，厚度仅为几 $\mu\text{m}$ 就可以取得较高的转换效率，为制造更廉价、低耗的光伏产品开辟了新思路。多元化合物薄膜电池均有较大的产业化瓶颈。III-V化合物半导体太阳能电池虽然具有很高的转换效率，但基板材料昂贵，且需要非常高难的制造技术（类集成电路），因此只能应用在航天等特殊领域。碲化镉、铜铟镓硒由于其所用铟元素和镓元素属于稀有元素，地壳中含量并不丰富，因此不利于大规模商业化生产。

图表：CdS/CdTe太阳能电池板的截面结构示意图



图表：CIGS太阳能电池截面结构示意图



资料来源：中国知网，安信证券研究中心整理

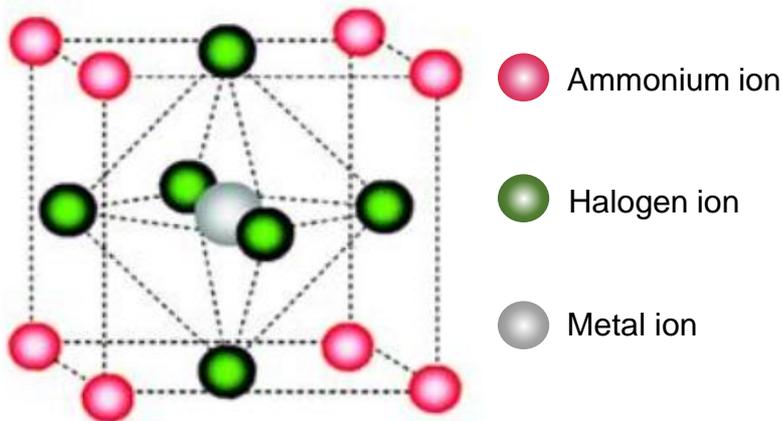
资料来源：中国知网，安信证券研究中心整理

## 1.4 钙钛矿电池—新型薄膜电池中的朝阳之光

钙钛矿材料（分子通式为 $ABX_3$ 的一类晶体材料）起初是1839由普鲁士科学家Gustav Rose于俄罗斯的乌拉尔山的矽卡岩中发现，并以沙俄地质学家Lev Perovski的名字命名。由于最早被发现的钙钛矿材料是钙、钛的复合氧化物（ $CaTiO_3$ ），因此国内将 Perovskite 翻译为“钙钛矿”。

在光电领域我们所谓的钙钛矿是指具有钙钛矿结构类型的 $ABX_3$ 型化合物，已经完成从钙钛矿氧化物到有机-无机杂化钙钛矿的演化。其中：A（顶点， $A=CH_3NH_3^+$ 、 $CH(NH_2)_2^+$ 等）有机阳离子（也可用 $Cs^+$ 无机阳离子），B（体心， $B=Pb^{2+}$ 、 $Sn^{2+}$ 等金属离子），X：（面心）卤素阴离子。钙钛矿结构的一个重要特征就是半径大小相差悬殊的离子可以稳定共存于同一结构中，故其衍生家族十分庞大。

图表：钙钛矿材料结构示意图



图表：钙钛矿容忍因子 $t$ 介于0.8-1.0之间具有光敏性

钙钛矿的容忍因子：

$$t = \frac{R_A + R_X}{\sqrt{2}(R_B + R_X)}$$

$R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_X$ 分别为A、B、X离子的半径

对于钙钛矿材料而言，容忍因子 $t$ 是是考量其能否维持稳定的 $ABX_3$ 结构的重要参数。一般而言，钙钛矿的 $t$ 介于0.813到1.107之间， $t$ 与1的差距越大，则晶格畸变越大。

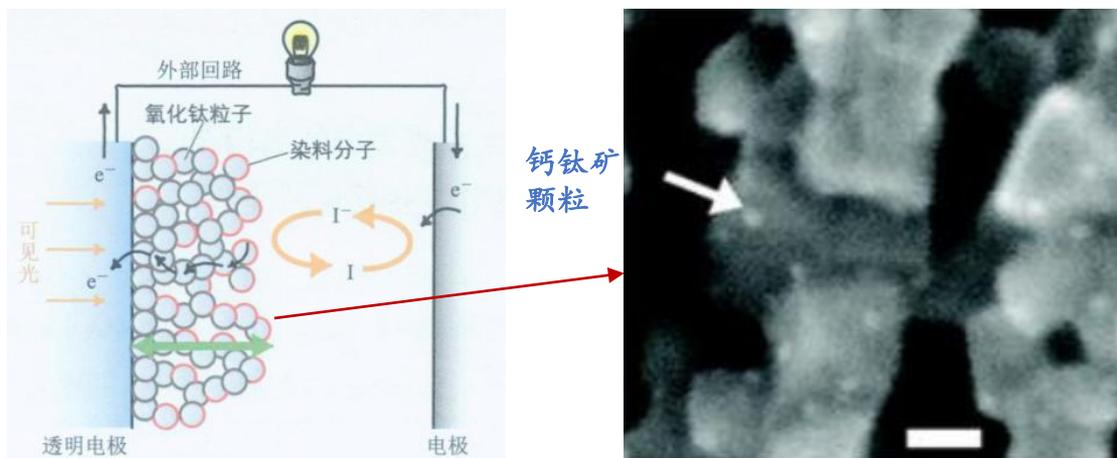
资料来源：Advanced Materials，安信证券研究中心

资料来源：《钙钛矿太阳电池第二版》，安信证券研究中心

## 1.4 钙钛矿电池一起源于染料敏化电池的敏化剂形式

最初，钙钛矿材料以染料敏化电池的敏化剂形式应用于太阳电池。纳米TiO<sub>2</sub>是做光催化剂的半导体材料，其带隙为3.0~3.2eV，所以几乎无法吸收可见光而呈无色透明状，无法直接用来制作太阳电池。因此在具有介孔结构的TiO<sub>2</sub>表面吸附**染料分子**，染料将吸收可见光，并用产生的电子和空穴来进行发电，称为染料敏化太阳电池。2009年，东京大学Tsutomu Miyasaka 教授制备出效率为转换效率为3.81%的钙钛矿电池，但在电解质中很容易分解。

图表：东京大学Tsutomu Miyasaka 教授制备出效率为转换效率为3.81%的钙钛矿电池



东京大学Tsutomu Miyasaka

perovskite sensitizer on TiO <sub>2</sub>	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF	η (%)
CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbBr <sub>3</sub>	5.57	0.96	0.59	3.13
CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub>	11.0	0.61	0.57	3.81

资料来源：A. Kojima, et al., J. Am. Chem. Soc., 2009, 安信证券研究中心绘制

## 1.5 钙钛矿电池VS晶硅电池—钙钛矿与晶硅本征性对比

钙钛矿材料性质：①直接带隙材料，主流带隙接近1.4eV（单结SQ极限比晶硅更高）且连续可调；②光吸收系数高，比晶硅高出近两个数量级；③载流子扩散长度长（微米级，与吸收深度相当）；④载流子迁移率高；⑤激子束缚能低等等。同时，有机无机杂化钙钛矿电池中常见的组成元素有碳、氢、氮、铅、碘等，在地球上都非常常见。优良的光电特性与物质丰度是钙钛矿电池能够实现商业化的最基础先决条件。

图表：钙钛矿材料具有良好的光电特性

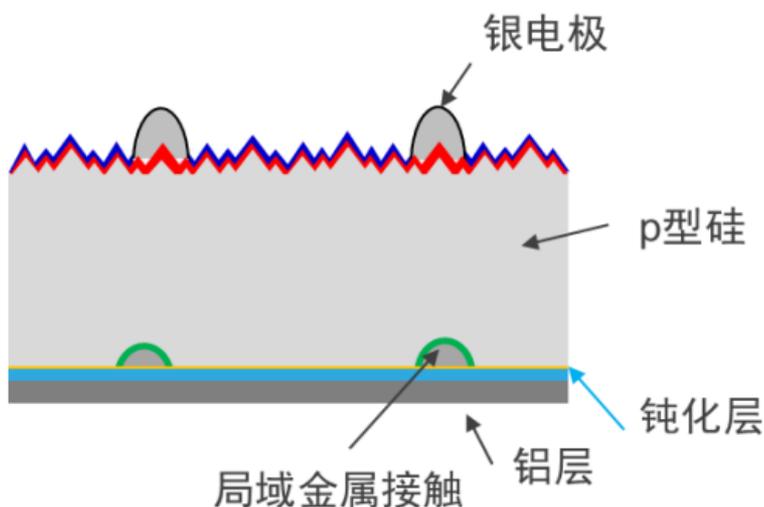
	钙钛矿	硅	铜铟镓硒	砷化镓
带隙 (eV)	1.5(可调)	1.1	1.12	1.42
吸收系数 (cm <sup>-1</sup> )	10 <sup>4-5</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4-5</sup>	10 <sup>4-5</sup>
迁移率cm <sup>2</sup> / (V·s)	>10	1500	<10	8500
载流子浓度 (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>16-17</sup>	10 <sup>16</sup>	10 <sup>15-16</sup>	10 <sup>17</sup>
载流子寿命	>μs	ms	50-200 ns	< 100nm
无序态能量 (meV)	15	11	25	7

资料来源：中国知网，中科院半导体所，安信证券研究中心整理

## 1.5 钙钛矿电池VS晶硅电池—电池片结构对比

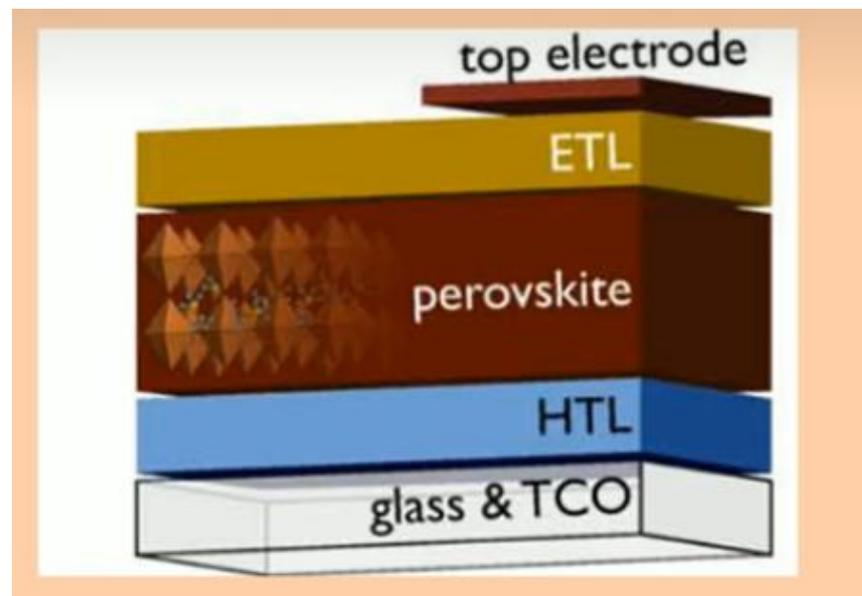
晶硅电池与钙钛矿电池一个很大的结构上的差异在于，吸光层材料与基底材料相分离，晶硅电池硅作为吸光层材料，在晶硅电池片中本身就承担基底材料的作用，对整个电池片结构形成物理支撑。钙钛矿电池吸光材料是钙钛矿活性层，基底材料主要为TCO。晶硅电池有非常明显N区指向P区的内建电场，钙钛矿电池也有内电场（如MAPI表现出固有的双极自掺杂行为），但通常我们不直接类比晶硅电池的PN结。

图表：晶硅太阳电池结构（以Perc为例）



资料来源：索比光伏网，安信证券研究中心

图表：钙钛矿太阳电池结构

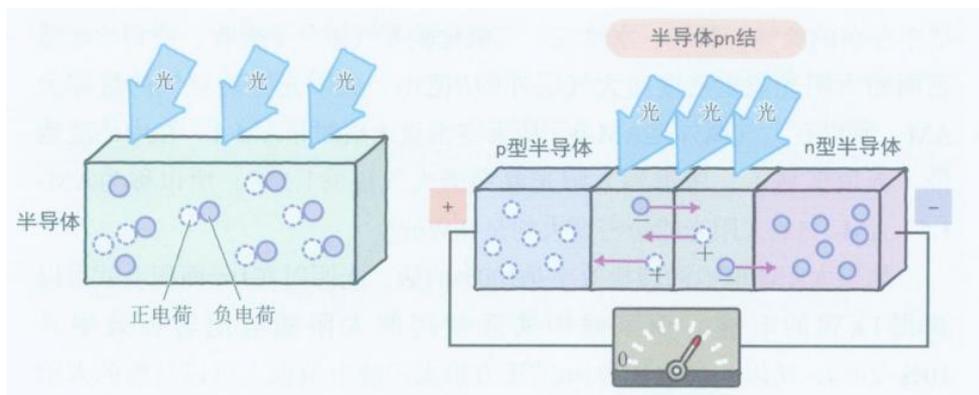


资料来源：电子工程专辑，安信证券研究中心

## 1.5 钙钛矿电池VS晶硅电池—工作原理对比

钙钛矿太阳电池一般由钙钛矿光活性层、缓冲层和电极构成。首先，太阳光从透明电极一侧入射，钙钛矿光活性层吸收光子并产生激子。由于钙钛矿材料的激子束缚能较小（相比其他有机电池），所以在电池工作条件下，光活性层中产生的大多数激子均会分离成自由电荷。接下来，自由的电子和空穴在钙钛矿材料中传输，并注入缓冲层。缓冲层主要指电子传输层（ETL）和空穴传输层（HTL）。电子传输层可以有效提取电子并阻挡空穴，而空穴传输层则相反，缓冲层提取的载流子进一步被相应的电极所收集。

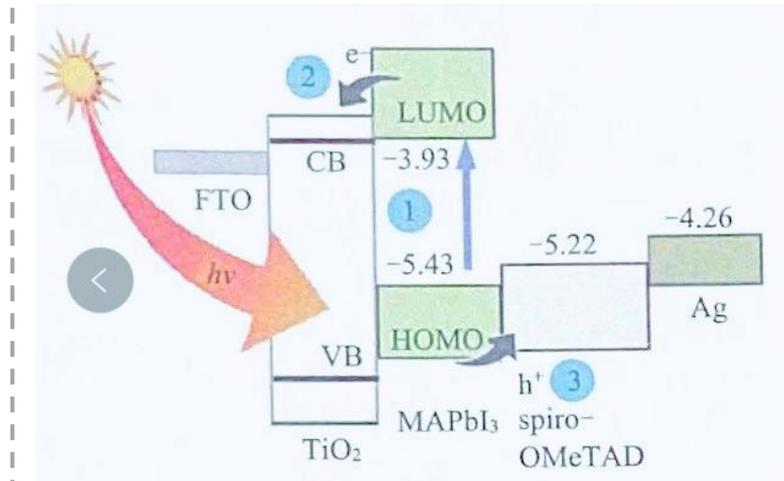
图表：晶硅电池工作原理示意图



仅当太阳光照射在半导体表面时，正、负电荷发生结合，此时不能产生电流（如左边所示），如果半导体内部有pn结存在的话，可以将正负电荷有序分离，此时就形成了电流。

资料来源：中国知网，安信证券研究中心整理

图表：钙钛矿电池工作原理示意图



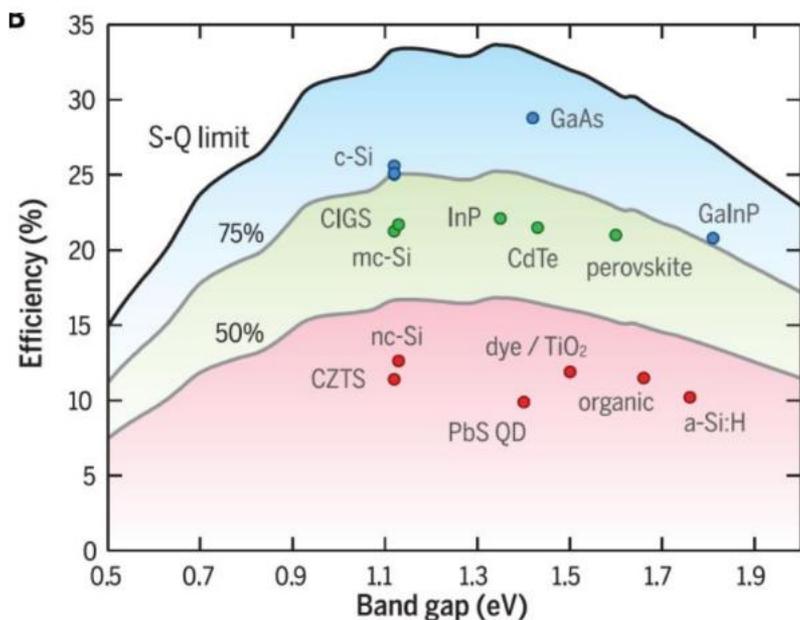
钙钛矿电池更多以来不同材料层的能级排布实现电子-空穴对的分离与传输/阻挡（也有内建电场的作用）

资料来源：《钙钛矿太阳电池》，安信证券研究中心

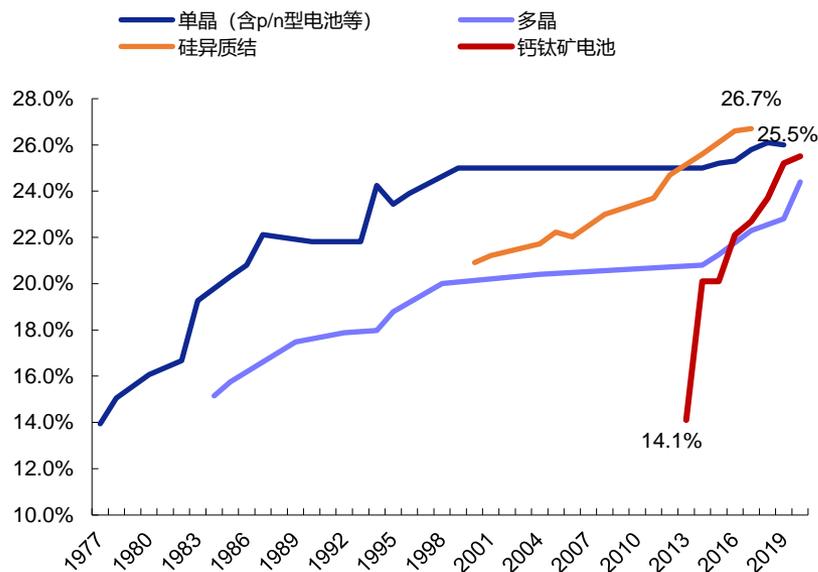
## 1.5 钙钛矿电池VS晶硅电池—光电转换效率对比

光伏电池片性能评价有三个重要的效率指标：①理论效率（极限效率）；②实验室效率；③产线平均转换效率，从投资的角度看，我们认为：**理论效率**决定了未来投资长期的“方向性”；**实验室效率**决定了投资的中长期的“可能性”；**量产的平均转换效率**决定了投资中短期的“确定性”。从理论效率看，钙钛矿单结电池SQ极限约33%，远超晶硅29%，且近年来钙钛矿的实验室效率迅速追赶晶硅，也是钙钛矿电池在资本市场异军突起的关键因素。

图表：钙钛矿单结电池SQ极限约33%，远超晶硅29%



图表：钙钛矿电池的实验室效率迅速追赶晶硅



资料来源：电子工程专辑，安信证券研究中心

资料来源：NREL，安信证券研究中心

02

## 钙钛矿太阳能电池的商业化本质



## 2.2 钙钛矿电池商业化本质二

**从晶硅到钙钛矿的商业化本质二：**行业属性从大宗工业品走向精细化学品，材料端从同质化竞争走向差异化竞争。

晶硅产业链制造环节从硅料到硅片到电池片及组件，同质化竞争色彩浓烈，且越接近上游，同质化越严重，效率瓶颈显现成本控制能力越来越重要。而钙钛矿材料本身的“可设计性”在制造端就会带来显著差异化。即使多种技术路线并行的电池片环节，其核心结构均是PN结，又不像半导体器件微观加工的程度那么深，较难出现大的颠覆性创新，因此学术界对于已然成熟的晶硅关注度少。而对于钙钛矿的 $ABX_3$ 型化合物而言，半径大小相差悬殊的离子可以稳定共存于一个结构中，所以其衍生的家族十分庞大。也就是对钙钛矿组件制造企业而言，其核心Know-How在于吸光层材料的配方（组分），不同的制造企业在核心钙钛矿材料端便会形成差异化的竞争。

图表：钙钛矿材料可通过组分调控来实现制造端差异化（示例）

组分结构/钙钛矿材料	带隙/eV	开路电压/V	短路电流/ $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$	填充因子(%)	光电转换效率 (%)
$\text{MAPbI}_{2.5}\text{Br}_{0.5}$	1.72	1.060	18.30	78.20	16.60
$(\text{FA}_{0.83}\text{MA}_{0.17})_{0.95}\text{Cs}_{0.05}\text{Pb}(\text{I}_{0.6}\text{Br}_{0.4})_3$	1.71	1.210	19.70	77.50	18.50
$\text{FA}_{0.6}\text{Cs}_{0.4}\text{Pb}(\text{I}_{0.7}\text{Br}_{0.3})_3$	1.75	1.170	17.50	80.00	16.30
$\text{FA}_{0.83}\text{MA}_{0.17}\text{Pb}(\text{I}_{0.6}\text{Br}_{0.4})_3$	1.72	1.150	19.40	77.00	17.20
$\text{FA}_{0.8}\text{Cs}_{0.2}\text{Pb}(\text{I}_{0.7}\text{Br}_{0.3})_3$	1.75	1.240	17.92	81.90	18.19
$(\text{FA}_{0.65}\text{MA}_{0.20}\text{Cs}_{0.15})\text{Pb}(\text{I}_{0.8}\text{Br}_{0.2})_3$	1.68	1.170	21.20	79.80	19.50

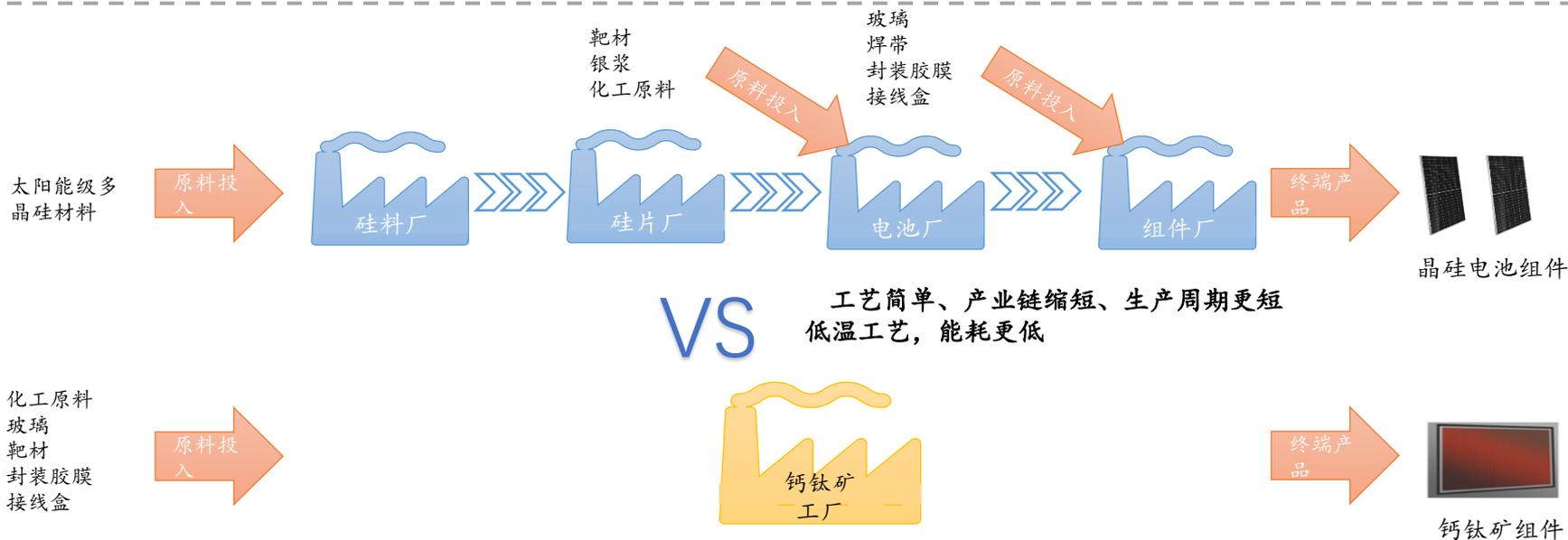
资料来源：《钙钛矿衍生光伏材料进展》，安信证券研究中心

## 2.3 钙钛矿电池商业化本质三

**从晶硅到钙钛矿的商业化本质三：工艺简洁带来生产集约化，产业环节自然缩短，产业链边界与技术边界模糊化。**

(1) 集约化生产显著缩短产业链：没有传统意义上的电池片环节，据协鑫光电透露：100兆瓦的单一钙钛矿电池工厂，从玻璃、胶膜、靶材、化工原料进入，到组件成型，总共只需45分钟。而对于晶硅来说，硅料、硅片、电池、组件需要四个以上不同工厂生产加工，倘若所有环节无缝对接，一片组件完工大概也要三天左右时间，用时差异很大。流程缩短将导致人力、物力的大幅节约，技术附加值得以体现。

图表：太阳能电池材料选用的原子序数越来越高，材料离子键越来越强



资料来源：协鑫光电，安信证券研究中心

## 2.3 钙钛矿电池商业化本质三

**从晶硅到钙钛矿的商业化本质三：工艺简洁带来生产集约化，产业环节自然缩短，产业链边界与技术边界模糊化。**

(2) **从高能耗到低能耗。**晶硅电池上游硅料主要来自于石英，需要提纯（通常为4N以上）。仅提纯过程温度一般要在1000℃以上，且长晶、部分电池片技术路线也是采用高温工艺，整体工艺流程的能耗非常大。钙钛矿缺陷容忍度高，甚至可以使用简单的溶液的制备方法形成多晶薄膜（就像涂了一层墨水），就能取得较高的转换效率，且制备均采用低温工艺，能耗低，也是集约化生产的体现。

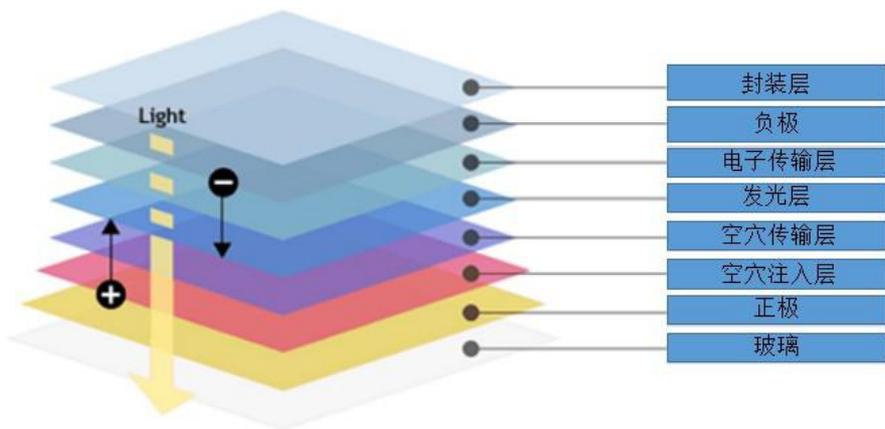
(3) **成套工艺的高度整合与集成，尤其是钙钛矿/晶硅叠层率先产业化的市场预期下，对设备企业而言“易会难精”。**没有传统意义上的电池片环节，前道工艺与后道工艺天然一体化，需要在工艺实现上兼顾的问题较多（例如制备空穴传输层在材料和工艺层面要综合考虑到载流子的抽取、阻隔钙钛矿离子的溢出、抑制水氧的渗透）。且钙钛矿与晶硅叠层的产业化会使工艺流程增加，需要进行工艺整合“合并同类项”。

## 2.4 钙钛矿电池商业化本质四

**从晶硅到钙钛矿的商业化本质四：迎接光伏制造“面板化”，从OLED、LCD切入钙钛矿产业链可能比从晶硅切入更容易，未来会有越来越多“跨界者”从面板涌入钙钛矿。**

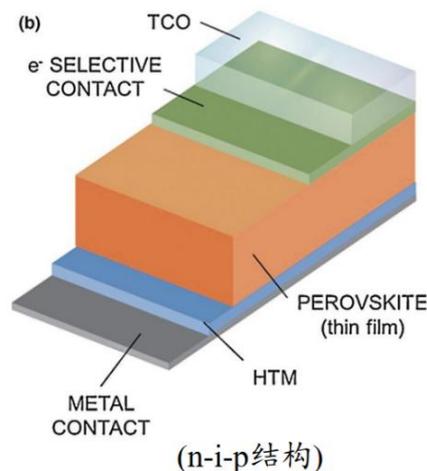
从泛半导体行业的视角看钙钛矿，其工艺发展路径已经有迹可循，可以参照面板行业，工艺体系具有高度相似性。OLED由以下几个部分组成：基层（透明塑料，玻璃，金属箔）、阳极、有机层、导电层、发射层、阴极构成，在发射层和传导层的交界处电子和空穴结合电致发光。钙钛矿太阳电池（以平面异质结反式结构为例）自下往上依次是玻璃、透明电极（ITO）、空穴传输层、钙钛矿层、电子传输层、金属电极，电子传输层和空穴传输层分别从钙钛矿膜层中提取电子和空穴，被电极收集形成电动势光致发电。从晶硅转向钙钛矿从工艺变化上我们认为可归结为“光伏制造面板化”。

图表：OLED结构示意图



资料来源：电子工程专辑，安信证券研究中心

图表：钙钛矿太阳电池结构示意图



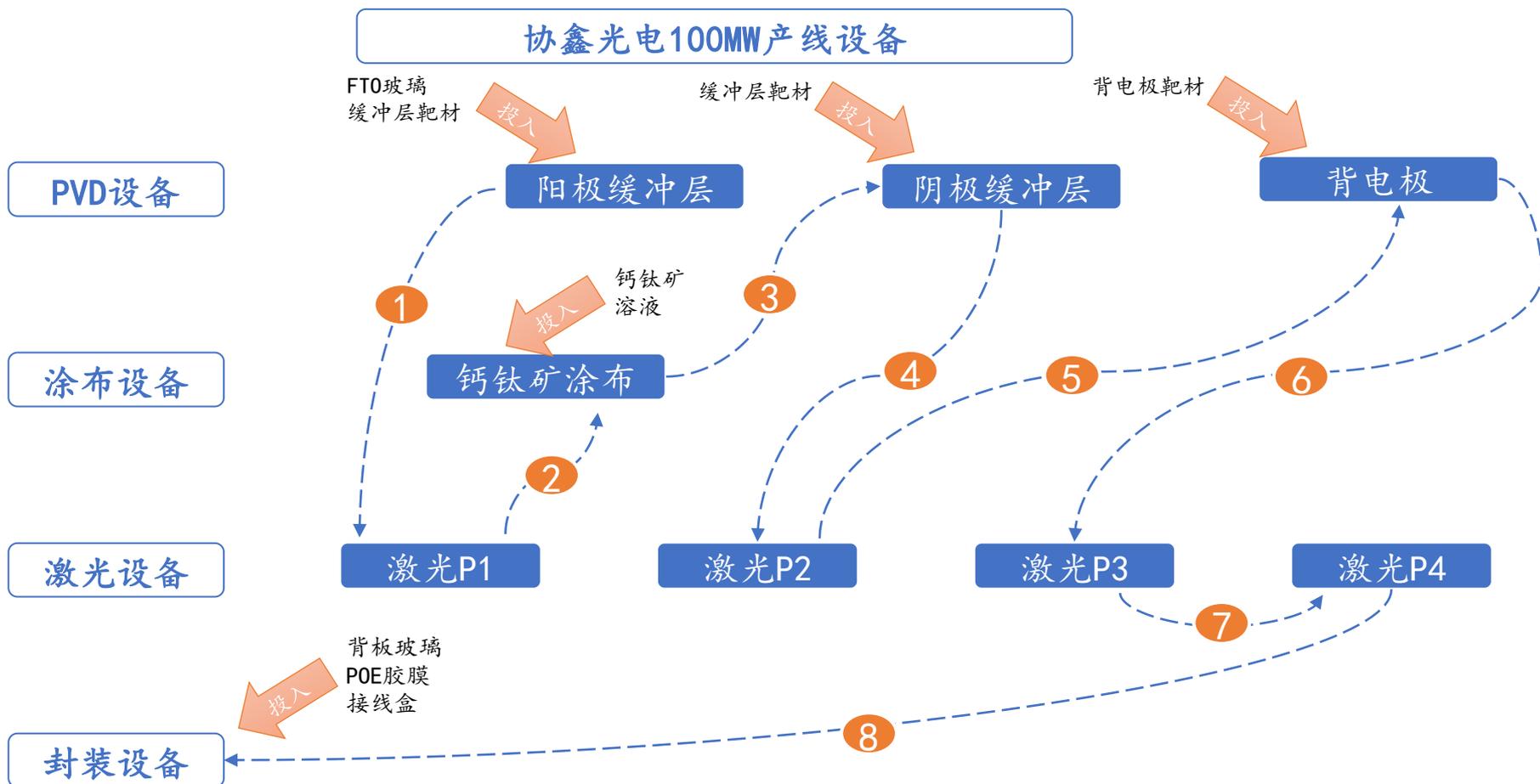
资料来源：电子工程专辑，安信证券研究中心

03

钙钛矿太阳能电池  
制备工艺及设备

### 3 钙钛矿太阳能电池制备工艺及设备

图表：协鑫光电100MW产线设备构成示意图（以协鑫光电为为例，部分产业化过程表面清洗完玻璃激光定义下电极）

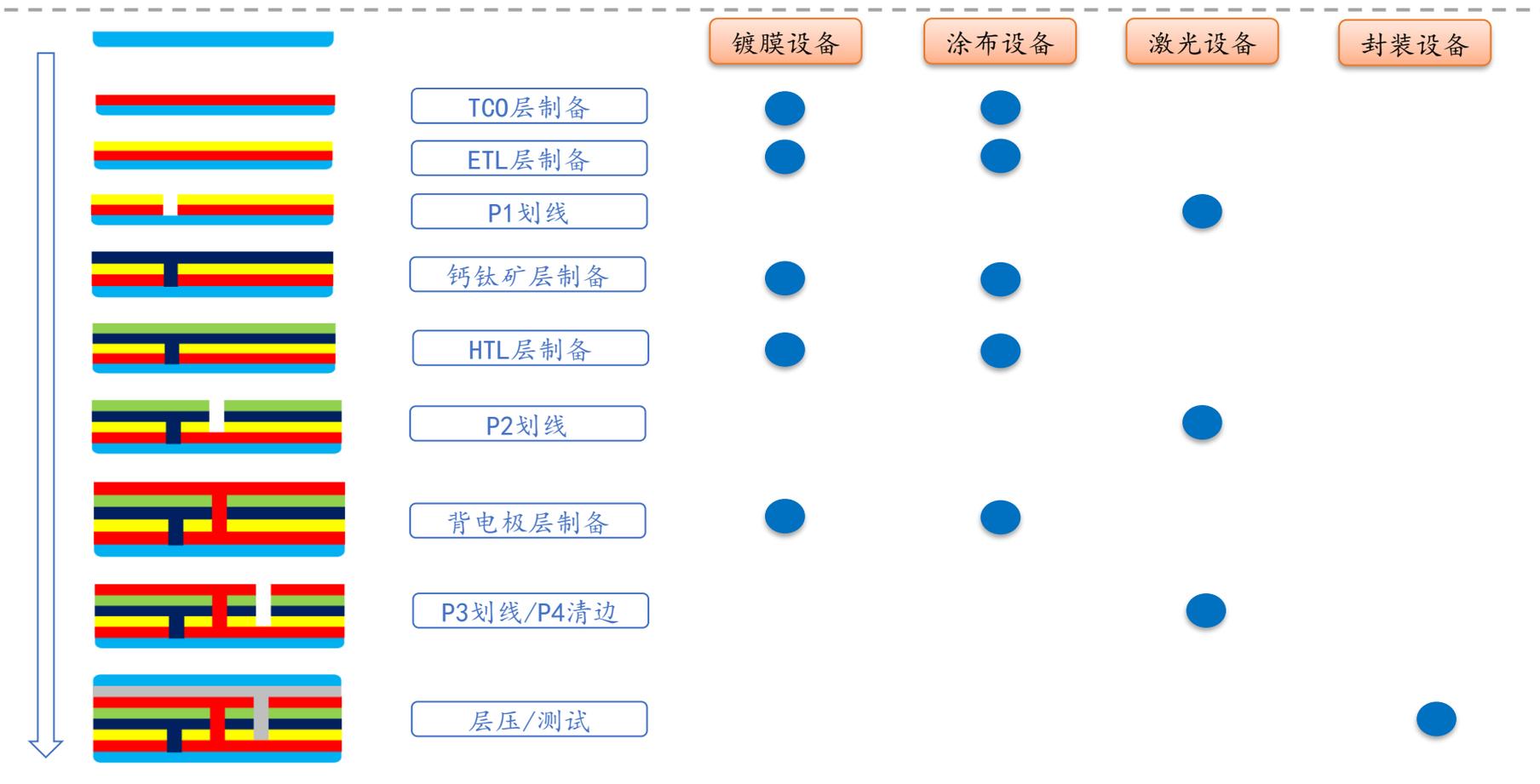


资料来源：协鑫光电，安信证券研究中心

### 3 钙钛矿太阳能电池制备工艺及设备

钙钛矿电池发展过程也是工艺、材料、设备不断匹配和优化、不断迭代的过程，目前工艺及设备尚未定型。

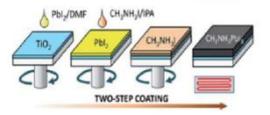
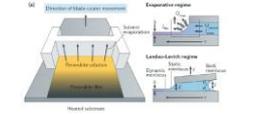
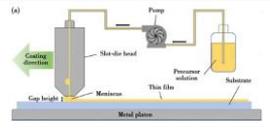
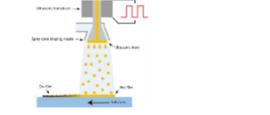
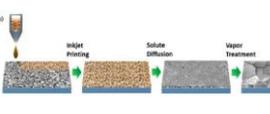
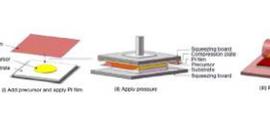
图表：钙钛矿单结电池主要制备工序（以平面异质结NIP结构为例）及对应主要设备



资料来源：安信证券研究中心

### 3 钙钛矿太阳能电池制备工艺及设备

图表：钙钛矿电池钙钛矿层薄膜湿法主要工艺

工艺类型	运行原理	优点	缺点	工艺示意图
一步旋涂法	最早制备钙钛矿多晶薄膜的方法，具体过程是利用移液枪将配置好的前驱体溶液滴在基底上，随后经过旋涂、退火等过程形成多晶薄膜	工艺简单、易操作 适合小面积制备	晶粒尺寸不均匀、有较多针孔缺陷；组装电池后的光电性能可重复性差；	
两步旋涂法	先在基底上旋涂无机PbX2/DMF 溶液，随后进行退火，接着第二步旋涂有机MAI/IPA 溶液，再次进行退火	工艺简单、易操作 适合小面积制备	相对于一步溶液法，薄膜形貌更好；基底覆盖率更高；器件效率可重复性更好；	
刮刀涂布法 (Doctor-blade coating, DB)	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的一种液相制膜方法。薄膜的厚度可通过前驱体溶液的浓度、刮板与基底的缝隙宽度、刮涂的速度和（或）风刀的压力大小进行控制。	可大面积制备，设备要求低，维护简单	材料利用率低	
狭缝涂布法 (Slot-die coating)	一种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、均匀钙钛矿液膜的一种沉积方法；该方法是工业上液相连续制膜的常用技术	可大面积制备，重复性强，可连续生产，材料利用率高	对设备精度要求高；	
喷涂法 (Spray coating)	一种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的一种液相薄膜沉积技术。钙钛矿层的大面积喷涂通常基于超声喷涂，使用超声波震动为动力	可大面积制备，设备成本低	材料利用率低，易造成腔室污染；喷涂过程中液滴大小和沉积位置的不确定性较大	
喷墨打印法 (Inkjet-print coating)	通过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的一种钙钛矿薄膜沉积方法。当钙钛矿前驱液墨水被喷出时，打印喷头和基板将按照预设程序进行相对运动，并且前驱体墨水会被均匀地打印在相应的位置	可大面积制备，原料利用率高	生产效率较低，喷墨头的维护与更换复杂	
软覆盖沉积法 (Soft-cover deposition, SCD)	2016年开发，一种无需溶剂和真空操作的大面积钙钛矿薄膜沉积方法，通过挤压板将滴在衬底中心的前驱液均匀分散在PI膜下，加热后剥离PI膜，形成薄膜	可大面积制备	材料利用率低，生产效率较低	

资料来源：CNKI，安信证券研究中心

### 3 钙钛矿太阳能电池制备工艺及设备

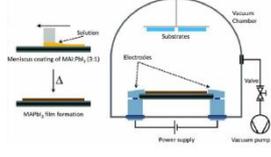
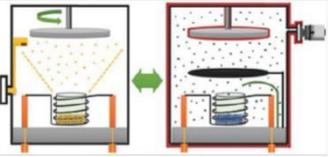
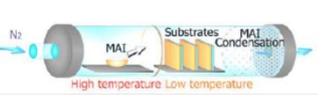
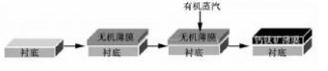
图：钙钛矿电池湿法成膜刮涂与狭缝涂布工艺参数对比

工艺名称	特性对比	溶液粘度要求	液膜厚度范围	墨水管理	原料利用率	可重复性	对基底平整度要求
刮刀涂布法 (Doctor-blade coating, DB)	刮涂法在工艺控制方面与狭缝涂布法具有很高相似度，可方便地转移到片对片、卷对卷等连续薄膜沉积工艺中去；相对狭缝涂布技术，刮涂法虽然在涂布液的供给方面自动化程度较低，但对小批量实验室研究而言，其溶液消耗量较少，且设备的清洗维护更简单。	1000~50000CPS	20~ 500 μm	开放型	较低	一般	高
狭缝涂布法 ( Slot-die coating)	相对刮涂，狭缝涂布法有以下优势：1) 目标钙钛矿液膜参数可以通过控制系统的参数设定进行精确数字化设计，如沉积液膜的厚度可通过涂布头与基底的缝隙宽度、基底移动速度、储液泵送料速度、风刀压力大小等进行预设。2) 是一种无接触式液膜制备技术，在涂布过程中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。3) 可以将钙钛矿前驱液密封在一个密闭的储液罐中，在前驱液沉积过程中可以保持其浓度不变，保证实验的可重现性，且这样的密闭环境可以保证人员安全，有效地隔离人与有机溶剂的接触	20~ 50000cps	1~500 μm	密闭式(储液罐)	较高	较好	一般

资料来源：CNKI，安信证券研究中心

### 3 钙钛矿太阳能电池制备工艺及设备

图：钙钛矿电池钙钛矿层干法及干湿结合成膜工艺

工艺类型		流程/原理	优点	缺点	工艺示意图
干法	双源共蒸	利用双气源共蒸发系统，通过在高真空的腔体内加热升华产生两种前驱体的蒸气，进而在衬底上沉积一层钙钛矿薄膜。不同于一步旋涂法，这种方法没有溶剂参与。	共蒸发所制备的钙钛矿薄膜与溶液法所得的薄膜具有同样的晶系结构；但薄膜更加致密、覆盖率更高、表面均一性更好	真空工艺设备昂贵；不好平衡无机盐和有机盐二者的蒸发速率；有机阳离子在高温下可能会挥发，不同种类的有机阳离子对热蒸发设备可能造成交叉污染。	
	单源蒸镀	将钙钛矿前驱物通过短暂蒸发使材料瞬间升华到基板上。具体方法如将 $PbX_2$ 和 $CH_3NH_3X$ 混合的前驱液涂覆在金属蒸发源上后退火除去溶剂，目的是更好地控制最终层的厚度和均匀性。再打开较大的蒸发电流瞬间将材料蒸发到基板上随后退火形成钙钛矿薄膜	不需要长时间保持两种前驱体的一定蒸发速率；以一个较为简单地方式将有机化合物平整的蒸发到基板上，以提升器件的性能；	制备薄膜微粒尺寸较小，造成缺陷较多；	
	分步气相沉积法	先将无机 $PbI_2$ 粉末蒸镀在基板上形成 $PbI_2$ 薄膜，随即在基板加热的条件下恒温蒸发有机 $CH_3NH_3X$ 粉末，通过控制基板的温度可以对钙钛矿薄膜形貌进行调控，最后在真空蒸发腔室中退火形成钙钛矿薄膜同时去除过量的 $CH_3NH_3X$	改善了 $CH_3NH_3X$ 由于蒸发难以控制而无法较准确的匹配 $PbI_2$ 蒸发速率的问题；该方法操作较为可控；		
	化学气相沉积法	在高真空环境中蒸发 $PbX_2$ ，获得均匀的 $PbX_2$ 薄膜，然后将 $CH_3NH_3X$ 粉末放于高温区域（ $185^\circ C$ ），通过 $N_2$ 气流将其蒸汽转移至低温区域 $PbX_2$ 薄膜处的反应位点。最后，在空气或手套箱中对制备的薄膜进行后退火工艺。	可以单独控制前驱物生长的尺寸形貌、成分等物性，且灵活性很高；成膜速率快；成膜质量好，成膜均匀性较好、致密度优秀；无需高真空条件，对设备要求较低，易于低成本批量生产	$N_2$ 气流的速率、反应的温度及压力较高的温度是制造高质量钙钛矿薄膜的关键因素，较高温度不能确保钙钛矿薄膜的形成，而较低温度下形成的薄膜在空气中不稳定。	
干湿结合	气相辅助溶液法	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的制备技术。	有效结合了溶液法和气相沉积法的优势；不使用分子泵，相对于物理气相沉积法成本更低；相比于溶液法具有薄膜致密的优点；可规模化扩展；制备的钙钛矿薄膜覆盖性好、表面粗糙；以及微米级大晶粒等特点；	薄膜与有机胺卤化物直接接触，局部位置会引发钙钛矿薄膜附着有机胺卤化物粉体难以清洗的问题。	

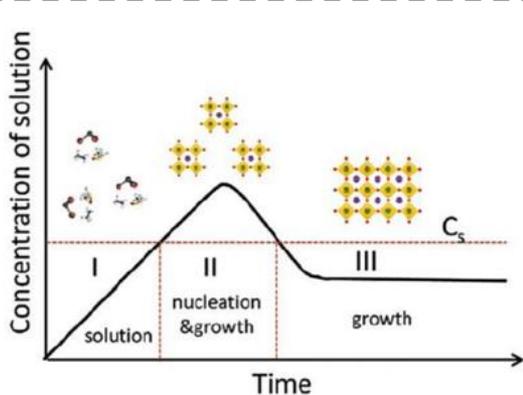
资料来源：CNKI，安信证券研究中心

### 3 钙钛矿太阳能电池制备工艺及设备

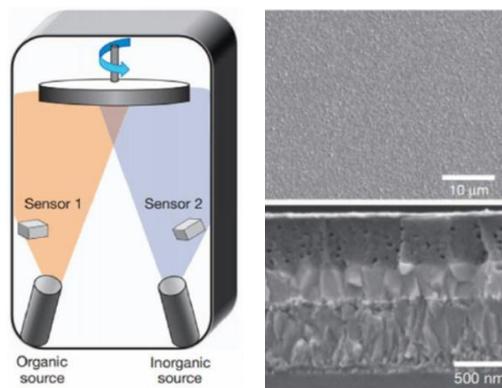
钙钛矿成膜工艺将先有到优，从湿法工艺走向干法工艺。

- 1) 钙钛矿湿法工艺中薄膜成长会经历前驱态（溶液态）——晶体成核与生长——晶体生长三个阶段。其中成核与生长一旦开始，其自然变化过程将非常迅速，很难控制薄膜表面的全覆盖及其均匀性、致密性。近年来，学界通过添加剂工程等手段调控钙钛矿的结晶动力学，改变其时间可操作窗口，并通过反溶剂、抽真空、吹风刀等后处理措施促进其快速成核以保证薄膜的连续形态，并通过低温长时间退火促进晶体的缓慢再生长。
- 2) 干法工艺中，以双源气相沉积为例，是把两种及以上的固态前驱体粉末加热成气态，相遇发生化学反应形成一种新的材料沉积到基底表面，最终形成一层薄膜。此方法优势在于薄膜均匀且致密，但对其前驱体含量需要精确控制，同时设备成本较高。同时此法在叠层电池中，不必对作为底电池的晶硅电池进行抛光，可以形成陷光结构，提高效率。

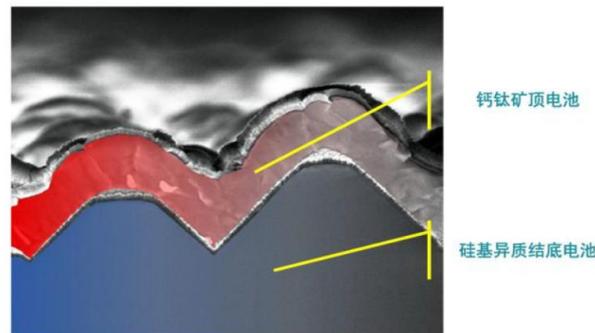
图：钙钛矿湿法成膜过程



图：钙钛矿干法成膜工艺及SEM图像



图：钙钛矿/HJT叠层电池实拍（陷光结构）



资料来源：CNKI，安信证券研究中心

04

钙钛矿电池商业化  
进展与产业化难题

## 4.1 钙钛矿太阳能电池公司在一级市场受到热烈追捧

尽管钙钛矿单结电池大规模商用尚处于较为早期的阶段，但是许多学术机构、行业新进入者、跨行业进入者纷纷瞄准这一长期趋势性方向。众多钙钛矿组件制造的明星公司在资本市场的加持下有望形成产业到资本的良性循环，加速产业化进程。

图表：钙钛矿部分明星公司一级市场融资情况（不完全统计）

序号	企业名称	披露日期	融资轮次	融资规模
1	协鑫光电	2022年12月14日	B+轮	5亿元
2		2022年5月13日	B轮	数亿元
3	众能光电	2022年12月5日	战略融资	未披露
4	脉络能源	2022年11月9日	天使轮	数千万元
5	纤纳光电	2022年9月27日	D轮	未披露
6	仁烁光能	2022年8月26日	Pre-A轮	数亿元
7	光晶能源	2022年8月26日	天使轮	3000万元
8	无限光能	2022年6月9日	天使轮	数千万元
9	曜能科技	2022年3月29日	B轮	未披露

资料来源：科创日报，安信证券研究中心

## 4.2 钙钛矿电池商业化瓶颈：高效率、大面积、高稳定性三者尚未相兼而善

钙钛矿电池虽然在实验室效率层面不断突破，但是仍然存在一定问题，即高效率、大面积、高稳定性三者之间仍然存在顾此失彼的情况。而光伏应用多数情况下是一个成本敏感型且低风险偏好的行业属性，高效率（本质上降低LCOE）、大面积（多数场景下的实用性）、高可靠性（持续稳定工作时长，尤其是地面电站长回收周期）三者缺一不可。

图表：国内钙钛矿组件制造企业研发进展

公司	时间	组件面积 (cm <sup>2</sup> )	组件效率	组件稳定性	测试条件
纤纳光电	2021	20	20.20%	70°C, 1000h, 功率基本持平	/
	2022.09.23	19.35	21.80%	/	/
	2019.1	300.74	14.30%	α 组件于2023年已顺利通过 IEC61215、IEC61730 稳定性全体系认证 效率寿命可达20年，光电转化效率可保持70%-80%	Voc: 28.95V; Isc: 19.79mA; FF: 70.00%
协鑫光电	2022	20000	≥16.00%E	已通过冰雹测试，可实现组件连续工作至少1000小时不衰减	/
万度光能	2018	3600	/	户外110米实证系统，数据未公布	/
极电光能	2021	63.98	20.50%	/	/
	2022.04.03	300	18.20%	通过工艺创新，保证在组件面积放大的同时，仍然能保持较高的转换效率	Temperature: (24±1)°C; RH (17±2)%;
	2022.09.15	756	18.20%		/
众能光电	2020	46.2	18.07%	/	/
	2023.01.10	61.58	20.08%	在组件面积提40.81cm(66%)同时，稳态光电转换效率同步提升3.45%(21%)	Voc: 11.820V; Isc: 130.633mA; FF: 80.10%

资料来源：安信证券研究中心整理

## 4.2 钙钛矿电池商业化瓶颈：高效率、大面积、高稳定性三者尚未相兼而善

钙钛矿材料具有许多本征的不稳定性：

①组分：有机铵离子，组分活性高

②相互作用：离子键合特性，范德华力作用

③晶体：反应活性高，缺陷密度大，离子易移动

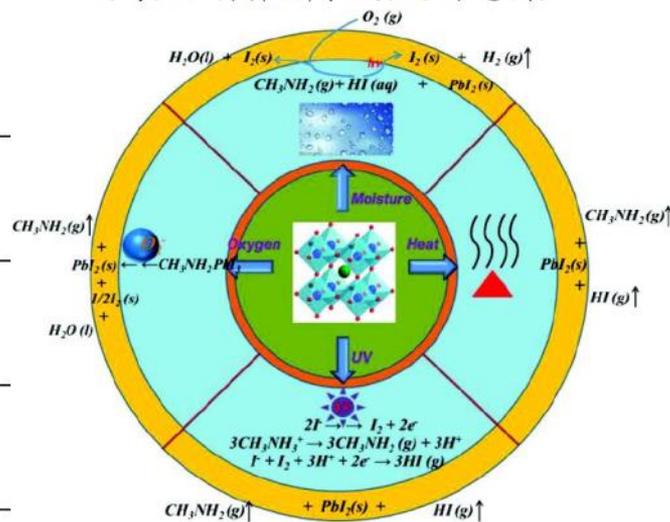
在水氧光热外部条件下极易失效（从学界看甲脒引入后已极大改善）。

图表：钙钛矿电池在水氧光热外部条件下极易失效

钙钛矿材料的4种衰减机理（以 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 为例）：

对水敏感	<p>在有水条件下，<math>\text{CH}_3\text{NH}_2</math>和<math>\text{HI}</math>溶解在水中，钙钛矿分解。</p> $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3(\text{s}) \xrightleftharpoons{\text{H}_2\text{O}} \text{CH}_3\text{NH}_2(\text{aq}) + \text{HI}(\text{aq}) + \text{PbI}_2(\text{s})$
对热敏感	<p>在较高温度条件下，<math>\text{CH}_3\text{NH}_2</math>和<math>\text{HI}</math>挥发，钙钛矿分解。</p> $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3(\text{s}) \xrightleftharpoons{\Delta} \text{CH}_3\text{NH}_2(\text{g})\uparrow + \text{HI}(\text{g})\uparrow + \text{PbI}_2(\text{s})$
对紫外线敏感	<p>在紫外线照射条件下，钙钛矿分解，<math>\text{TiO}_2</math>的光催化作用会加速分解。</p> $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3(\text{s}) \xrightleftharpoons[\text{TiO}_2]{\text{UV}} \text{CH}_3\text{NH}_2(\text{g})\uparrow + \text{HI}(\text{g})\uparrow + \text{PbI}_2(\text{s})$
对氧气敏感	<p><math>\text{O}_2</math>氧化碘离子，钙钛矿分解。</p> $4\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3(\text{s}) + \text{O}_2 \rightleftharpoons 4\text{CH}_3\text{NH}_2(\text{g})\uparrow + 2\text{I}_2(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 4\text{PbI}_2(\text{s})$

（钙钛矿材料4种衰减机理示意图）



资料来源：中国知网，安信证券研究中心整理

### 4.3 未来趋势：叠层&钙钛矿单结双线并举

我们认为从钙钛矿电池的商业化进程来看，初期钙钛矿/晶硅叠层有望时间维度上领先于钙钛矿单结电池率先实现大范围产业化，而钙钛矿单结电池的主要目标市场为BIPV、CIPV及消费级小组件，首要目标是取代其他薄膜类电池：**我们认为钙钛矿/晶硅叠层先行的原因如下：**

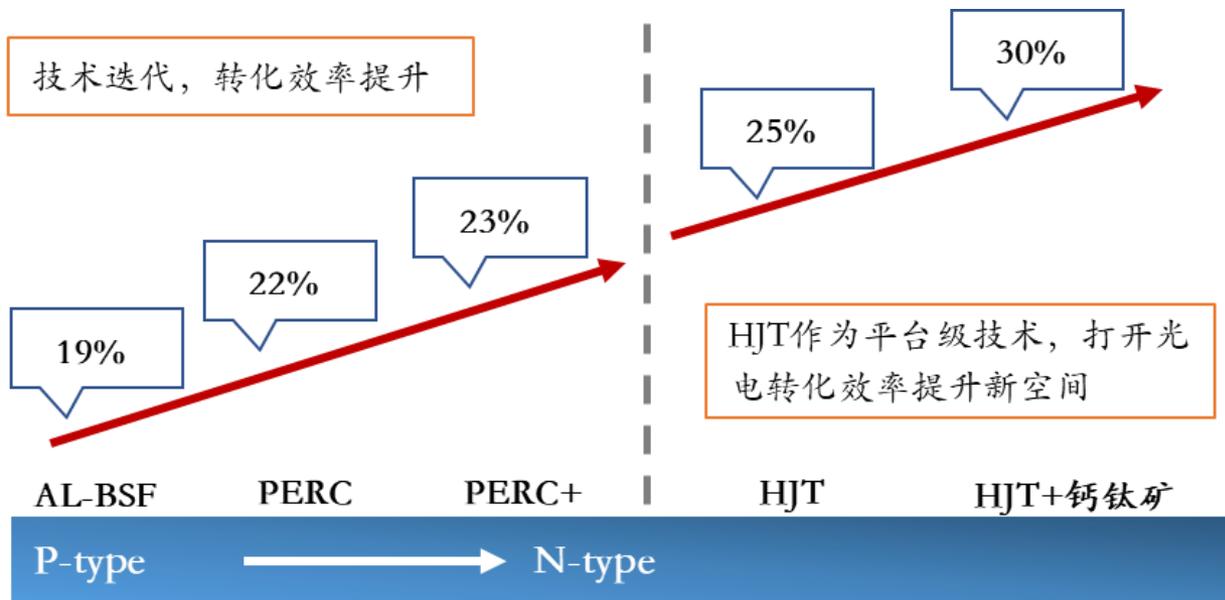
(1) 光伏应用的多数应用场景是低风险偏好的，即对可靠性要求极高，而晶硅电池历经数十年市场洗礼其市场地位短期难以撼动。光伏的底层技术是半导体，决定了其在供给端创新速度较快，工艺迭代频繁；而需求应用端多为长回收期项目（以地面电站为代表），因此光伏新技术从萌芽到最终应用接受会存在一定时间差。而市场不会怀疑钙钛矿电池长期的优越性与替代晶硅的趋势性，但钙钛矿电池作为新型产物目前缺少的是产品“可靠性”的背书，且可靠性背书的积累非一朝一夕之功。因此钙钛矿电池商业化的最优选择，第一步就是先融入晶硅电池做叠层，成为晶硅产业链的一部分，站在成熟晶硅电池的肩膀之上积累自身可靠性（晶硅基本已无需证明自身可靠性），因此我们判断钙钛矿电池商业化之路是先融入晶硅，待可靠性积累到一定阶段，后凭借性能优势反客为主的过程。

(2) 从技术上看，钙钛矿/晶硅叠层可直接解决大面积问题，破解钙钛矿电池当前高效率、大面积、高可靠性三者顾此失彼困局。钙钛矿电池在大面积条件下无论是用湿法旋涂亦或干法蒸镀，其一致性均较难保证，电池容易处于“非平衡态”导致效率大打折扣。而基于晶硅做叠层则无需考虑大面积问题，后续仍会通过串并联形成组件阵列，且随着干法蒸镀工艺的成熟，钙钛矿/晶硅叠层并不会牺牲晶硅的绒面形貌。

### 4.3 未来趋势：叠层&钙钛矿单结双线并举

(3) 钙钛矿/晶硅叠层的理论效率高于钙钛矿单结，晶硅电池发展到一定瓶颈后会自发朝钙钛矿/晶硅叠层方向去演进。钙钛矿与晶硅构成叠层电池后，可有效拓宽电池的光谱响应，其理论极限效率约为42.5%，钙钛矿单结电池的极限效率约为33%。晶硅单结电池的极限效率约为29.43%，叠层技术成熟后将大大延续晶硅电池的生命周期。

图表：HJT+钙钛矿可以突破晶体硅太阳电池的效率极限



资料来源：梅耶博格，安信证券研究中心

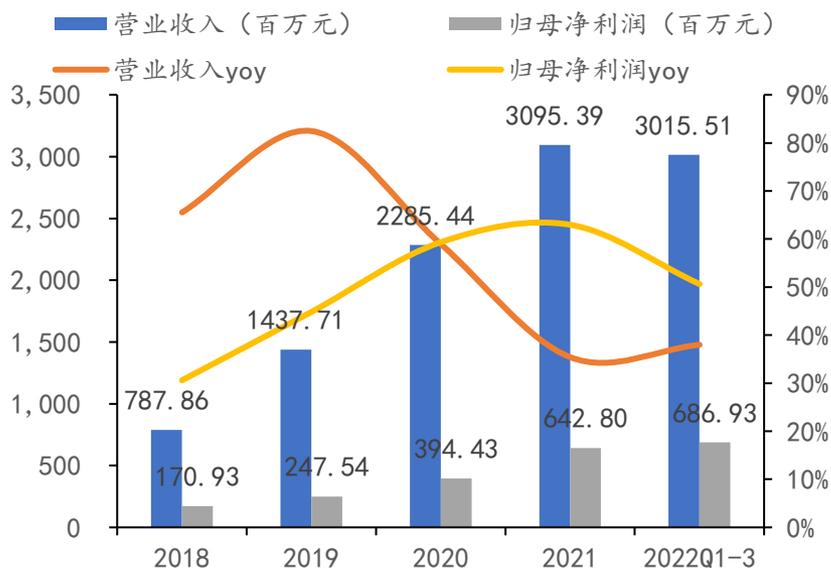
05

## 钙钛矿太阳能电池投资主线

## 5.1 基于产业化可行性，建议关注迈为股份、捷佳伟创

迈为股份：HJT整线设备龙头，薄膜沉积工艺理解深厚，钙钛矿/HJT叠层时代有望延续HJT时代竞争优势，钙钛矿激光设备已交付。由于HJT虽然属于晶硅电池，但其核心层工艺均采用薄膜工艺（PVD CVD），与钙钛矿形成叠层电池工艺可整合性强，且前表面TCO导电层可直接与钙钛矿电池形成叠层串联结构，因此钙钛矿/HJT叠层是学术界与产业界优先尝试的方向。迈为股份在HJT电池路线凭借对薄膜沉积设备深厚的理解与整线成套工艺解决方案，2022年市占率一枝独秀，在钙钛矿/HJT叠层时代其竞争力仍有望延续。

图表：迈为股份营业收入和归母净利润情况



资料来源：wind，安信证券研究中心

图表：迈为2022年HJT设备招标市占率达80%

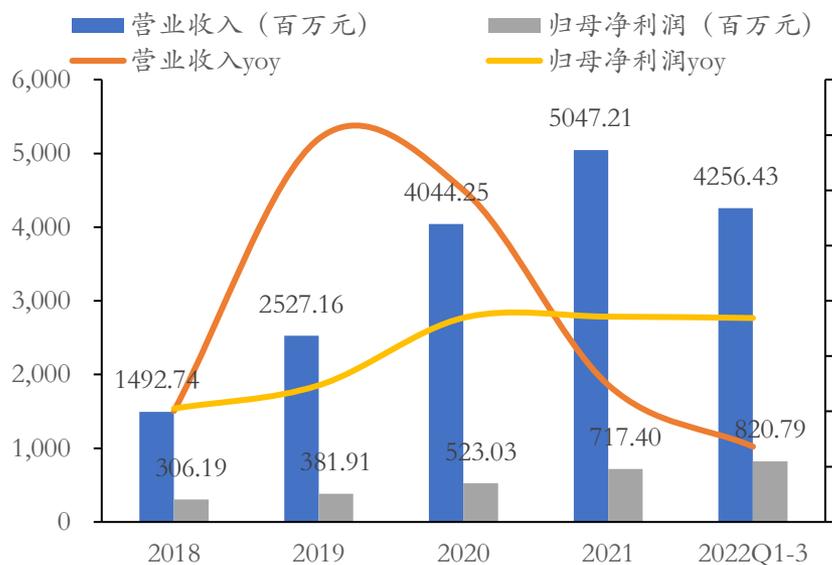
序号	签署/公告日期	招标人	中标人	招标产品	招标量/GW
1	2022/9/4	华晨	迈为 (7.2GW)、理想万里晖、江苏启威星	HJT生产线12条	10
2	2022/4/15	信实工业 (REC)	迈为	HJT整线8条	4.8
3	2022/7/6	爱康科技	迈为	210半片HJT整线2条	超1.2
4	2022H1	某新玩家	迈为	-(整线)	1.2
5	2022/9/13	浙江润海 (华润&爱康)	迈为	HJT整线3条	1.8 (一期剩1.2)
6	2022/8/16	国晟能源	金石能源	HJT整线	一期1
7	2022/9/25	宝馨科技	迈为 (1GW)，金石	HJT生产线	一期2
8	2022/4/18	东方日升	迈为 (3.6GW)、金石	HJT生产线	5.2
9	2022/9/29	金刚玻璃	迈为	HJT整线8条	4.8
合计					32

资料来源：安信证券研究中心

## 5.1 基于产业化可行性，建议关注迈为股份、捷佳伟创

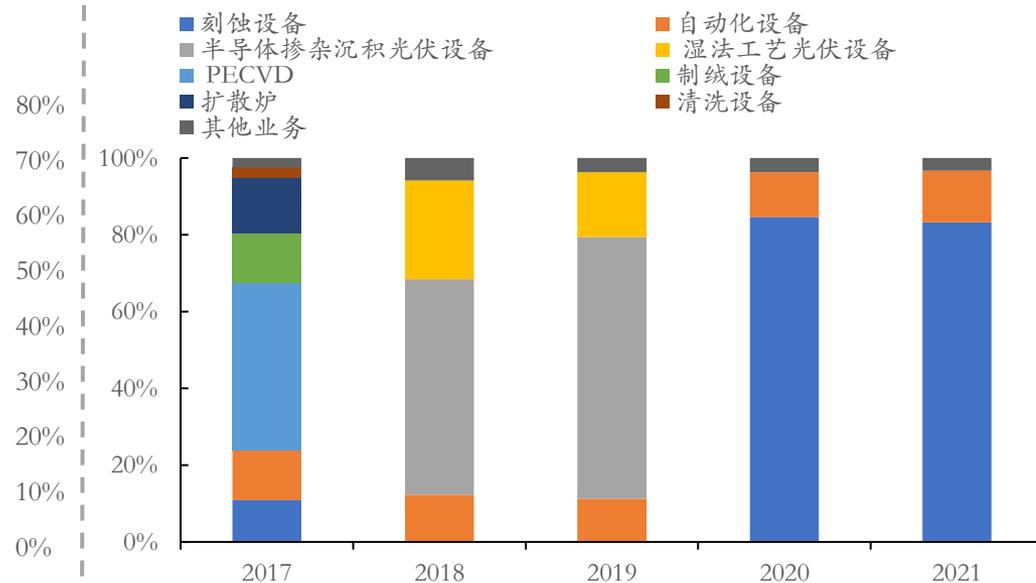
**捷佳伟创：PERC工艺设备龙头，多类型钙钛矿电池相关设备获订单。**公司成立于2003年，为光伏电池设备龙头企业，技术布局覆盖PERC、TOPCon、HJT、HBC、IBC、钙钛矿等主要技术路线，其中PERC电池主要工艺设备的市场占有率超过50%。公司为日本住友RPD专利中国大陆唯一销售制造授权设备商，进一步开发的RPD设备2021年10月即中标钙钛矿中试线设备订单，同时于2022年钙钛矿低温低损薄膜真空沉积设备获某央企研究院订单，自主研发的共蒸法真空镀膜设备中标某全球头部光伏企业的钙钛矿电池蒸镀设备项目，狭缝涂布设备、PVD设备亦获得相关订单，同时公司积极向钙钛矿叠层电池、整线设备方向不断拓展。

图表：捷佳伟创营业收入和归母净利润情况



资料来源：wind，安信证券研究中心

图表：捷佳伟创历年细分业务收入占比

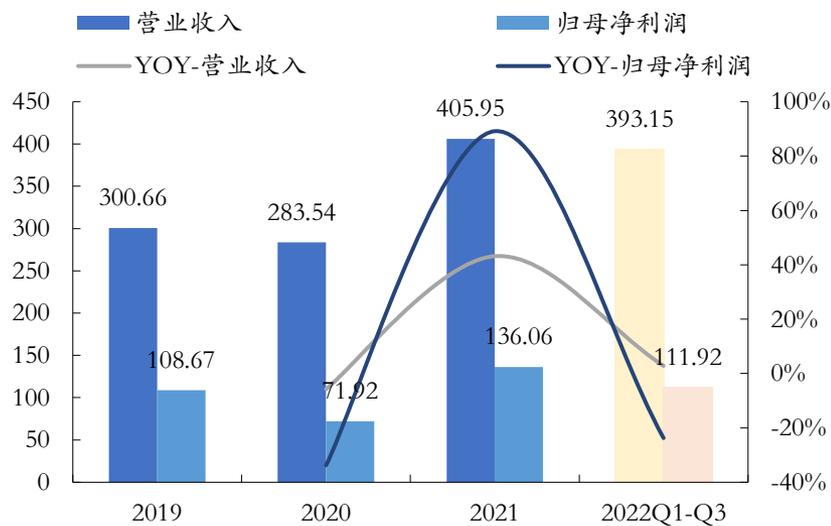


资料来源：wind，安信证券研究中心

## 5.2 基于钙钛矿电池从有到优，工艺转型建议关注奥来德、京山轻机

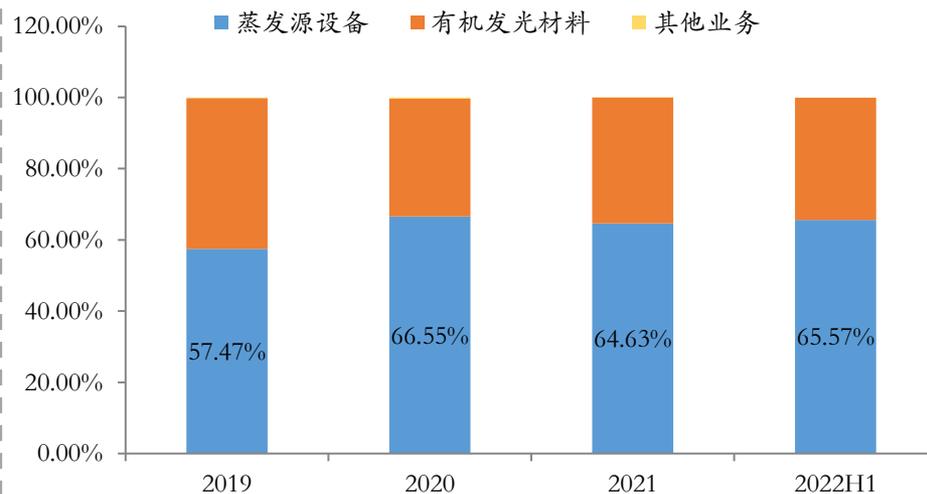
**奥来德：国产线性蒸发源龙头，立足OLED基于技术同源延伸布局钙钛矿产业。**公司成立于2005年，作为中外合资的OLED领域龙头企业与日本研究所有多方面合作，主要从事有机电致发光材料（OLED材料）及新型显示产业核心设备的自主研发、规模生产、销售和服务，技术水平达到国内领先。其中核心组件蒸发源设备打破国外垄断（公司是唯一6代AMOLED线性蒸发源国产供应商），连续三年占公司主营业务收入60%以上，成功实现产业化和进口替代，在国内适配Tokki蒸镀机的蒸发源中市占率约80%。截至目前，累计申请300余项国家专利，聚焦OLED技术研发，建立生产基地和创新开发平台，为进一步布局钙钛矿电池领域创造条件、打开市场空间。

图表：营业收入、归母净利润及增速/百万元



资料来源：wind，安信证券研究中心

图表：历年细分业务收入占比

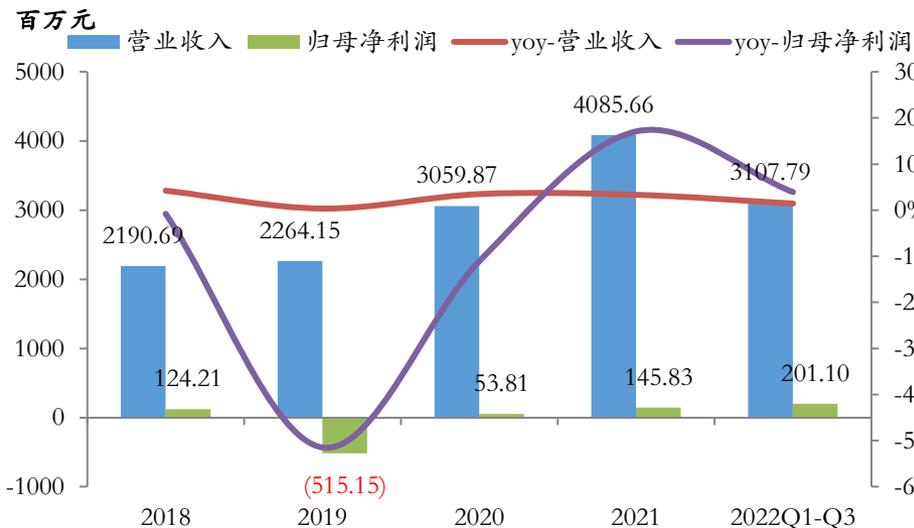


资料来源：wind，安信证券研究中心

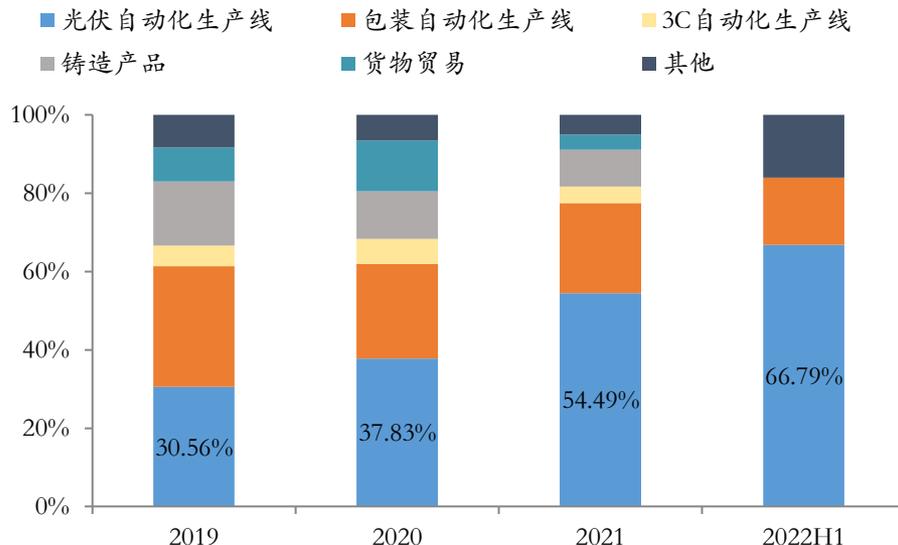
## 5.2 基于钙钛矿电池从有到优，工艺转型建议关注奥来德、京山轻机

**京山轻机：**布局PVD、ALD、团簇型多腔室蒸镀设备，与协鑫光电签订战略合作协议。公司成立于1993年，于2010年创立全资子公司晟成光伏，主要从事于光伏行业智能化装备的研发、制造、销售及服务。作为光伏细分领域龙头企业，公司深入布局PERC、TOPCON和HJT三大电池路线，通过建立研发中心、技术转让、与高校开展技术合作等完成技术积累，成为业内较早完成钙钛矿设备开发且有实际产品销售的企业。2022H1光伏设备占公司营收约67%，多项核心镀膜设备成功交付，得到客户认可。此外，2021年5月，公司携手协鑫光电签署《钙钛矿叠层电池技术合作开发协议》，为大规模商业化量产钙钛矿电池奠定基础。

图表：营业收入、归母净利润及增速



图表：历年细分业务收入占比



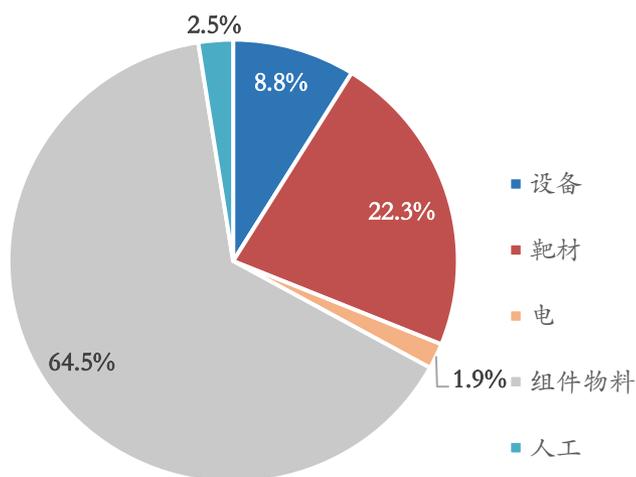
资料来源：wind，安信证券研究中心

资料来源：公司公告，安信证券研究中心

## 5.3 基于成本结构，建议关注金晶科技、隆华科技等

晶硅电池硅片即作为核心吸光层材料，也作为支撑电池片结构的基底材料，而钙钛矿电池吸光层与基层发生分离。从成本结构看，钙钛矿单结电池中，占比最多的是组件物料，大概占比64%，约0.518元/W，其中TCO玻璃约为0.19元/W，投产10GW理论市场扩容约20亿人民币。同时，相对于其他功能层的材料种类繁多，TCO品类相对集中，主要为ITO、FTO、AZO等，品类集中带来价值集中，值得优先关注。

图表：钙钛矿单结电池预期成本结构



图表：钙钛矿单结电池成本主要组成备份市场空间测算

钙钛矿单结电池成本主要组成部分市场空间测算

种类	钙钛矿单结电池单w成本	投产规模对应市场空间/亿元			
		投产1GW	投产10GW	投产50GW	投产100GW
靶材	0.179元/w	1.8	17.9	89.5	179
设备	0.071元/w	3.6	35.5	177.5	355
TCO玻璃	0.19元/w	1.9	19.0	95.0	190.0

备注：TCO玻璃至少500万平米/GW；TCO玻璃价格以38元/平米（2.65mm）计算

资料来源：ELVA-TECH，安信证券研究中心

资料来源：安信证券研究中心

## 5.3 基于成本结构，建议关注金晶科技、隆华科技等

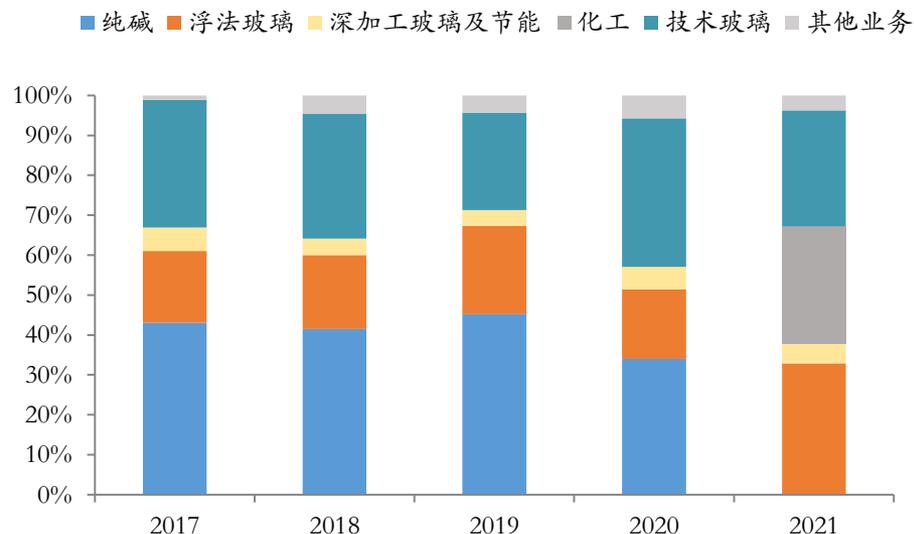
**金晶科技：TCO镀膜玻璃国产领军者，与纤纳光电供货协议。**公司成立于1999年，主要生产浮法玻璃、在线镀膜玻璃和超白玻璃，主营业务是玻璃、纯碱及其延伸产品的开发、生产、加工、经营。2021年公司成功开发3.2、2.65 mm超白TCO导电玻璃，成为国内外为数不多掌握TCO导电膜玻璃技术且能实现量产的企业之一，并已实现向国际薄膜电池巨头First Solar供货。2022年公司和纤纳光电签订协议，约定若纤纳光电每增加1GW的钙钛矿电池产能规划，则公司投产不低于500万平米/年的TCO玻璃产能，同时公司2022年5月国内首条TCO玻璃产线正式投产，年产1800万平，并计划将滕州二线600T/D产线升级改造为TCO玻璃。

图表：营业收入、归母净利润及其增速



资料来源：wind，安信证券研究中心

图表：历年细分业务收入占比



资料来源：wind，安信证券研究中心

## 5.4 基于封装的功能性意义，建议关注金辰股份

钙钛矿晶体对水分、氧气、光线和温度都非常敏感，封装的功能性意义更加凸显，同时器件封装是钙钛矿提升稳定性措施中，少数除材料自身方向以外的措施之一，可替代性低。

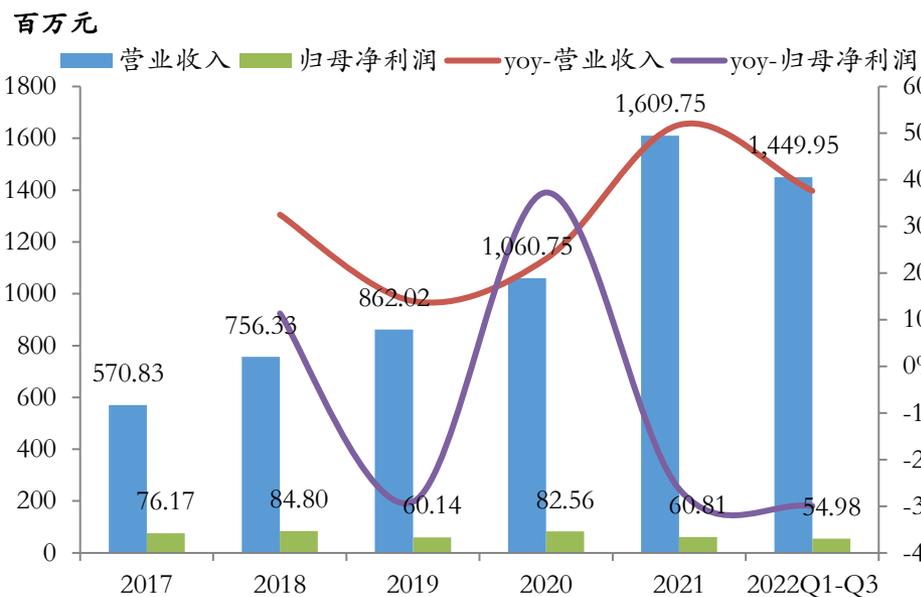
图表：钙钛矿电池提高稳定性的措施

改进方向	原理/作用	具体措施举例
应力调控晶体结构	晶格应力可改变钙钛矿晶体结构，调控材料稳定性。晶格应力包括：1. 因离子分布或尺寸不匹配造成的晶格内应力；2. 因钙钛矿与基底材料晶格或热膨胀系数不匹配造成的外应力	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 使用低温钙钛矿薄膜形成技术，使用与钙钛矿热膨胀系数相匹配的衬底</li> <li>2. 调整基质组成和相应的晶格参数（卤化物钙钛矿单晶薄膜在晶格不匹配的卤化物钙钛矿衬底上的应变外延生长）</li> </ol>
开发低维钙钛矿	一般情况下A位阳离子与[PbX <sub>6</sub> ] <sup>4-</sup> 八面体形成三维电子结构，但其离子键作用力弱，易从晶格中脱离，造成钙钛矿结构破坏；当A位为更大的阳离子时，A位与八面体的离子键显著增强，从而提高钙钛矿材料的稳定性，但当A位阳离子半径过大，八面体容易由共顶点转化为共面或共边连接的二维或一维晶体结构。低维钙钛矿存在较大的激子束缚能、载流子传输局域、有机间隔阳离子充当载流子绝缘势垒等问题，导致器件效率低于三维钙钛矿太阳能电池。	通过固溶处理方法制备了一维(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> SPbI <sub>3</sub> 纳米棒阵列，阳离子与八面体间结合力格外强，可在在大气环境中保持60d以上未见形态和晶体结构的改变，但效率仅2.07%，需通过其他方式提升。
晶界钝化	钙钛矿薄膜一般为多晶，晶界处存在大量的缺陷，如未配位的卤素和金属离子等，H <sub>2</sub> O和O <sub>2</sub> 等易与缺陷结合或沿着缺陷穿透钙钛矿，导致钙钛矿分解，且缺陷会成为局部电荷复合中心；晶界钝化后，晶界处的小分子能够有效地抵御水汽的进入，使其在50%的湿度环境下经过40d仍保持80%以上的器件初始效率，同时钝化剂可调控钙钛矿薄膜的结晶行为，调控晶界势垒，抑制非辐射复合，提高载流子输运能力等	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 利用Rh<sup>3+</sup>钝化钙钛矿薄膜晶界缺陷，理论计算和实验表明Rh<sup>3+</sup>与碘离子和甲胺阳离子中的N通过化学键结合，钝化了碘离子和有机阳离子空位缺陷；</li> <li>2. 在钙钛矿晶界处引入半导体有机小分子，钝化Pb<sup>2+</sup>空位或Pb-I反位缺陷。</li> </ol>
界面调控	界面能够实现更好的能级匹配、消除迟滞、延迟电荷重组，对电荷的产生、收集和运输至关重要，并直接影响稳定性。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 采用固相法在钙钛矿薄膜表面原位设计二维(C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>PbI<sub>4</sub>薄膜应用于钙钛矿太阳能电池，二维钙钛矿钝化了三维钙钛矿表面缺陷，保护了三维钙钛矿；</li> <li>2. 通过碘终端分子自组装单层分子与界面羟基反应，从而消除会产生界面电荷陷阱和空隙的界面羟基，提高ETL和钙钛矿层的结合柔韧度</li> </ol>
器件封装	钙钛矿电池的密闭封装不仅能够阻隔水汽等对钙钛矿材料的侵蚀，而且能够有效防止各种分解产生的气体分子的扩散，维持了钙钛矿体系材料组分的平衡，并且残留物能够促进钙钛矿的再生，使电池的循环使用寿命增加，并降低Pb泄露风险	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 利用聚合物封装整个器件，器件与聚合物紧密接触，内部不存在任何的空腔，钙钛矿太阳能电池在IEC 61215：2016标准测试条件下工作4000h后效率仍旧保持在95%以上。</li> <li>2. 采用聚异丁烯(PIB)进行覆盖封装和边缘密封，再用玻璃进行封装，可达到-40℃~80℃下工作1800h后不解</li> </ol>

## 5.4 基于封装的功能性意义，建议关注金辰股份

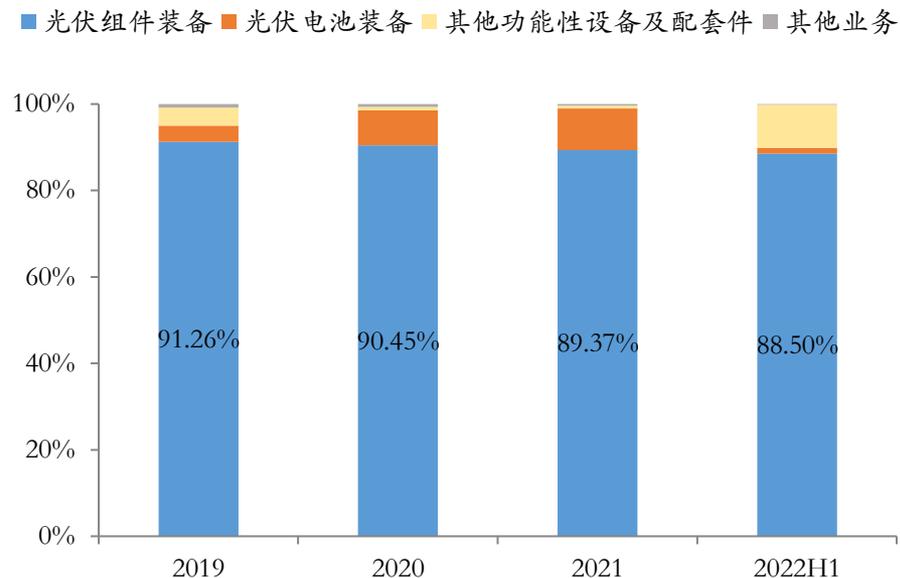
**金辰股份：光伏组件层压机龙头，同时布局HJT组件封装技术。**公司成立于2004年，至今深耕太阳能光伏装备制造行业近二十年，可以提供激光划片机、串焊机、丝网印刷机、叠片焊接机、汇流条焊接机、层压机、EL测试仪等设备，覆盖了光伏组件全设备。公司通过不断研发升级产品，在光伏组件领域始终保持行业领先地位，目前是全球光伏组件设备龙头企业，根据东方财富网，其核心产品层压机市占率约40%左右，目前公司正在积极布局下一代新型HJT薄片化高效组件封装技术。

图表：营业收入、归母净利润及其增速



资料来源：wind，安信证券研究中心

图表：历年细分业务收入占比

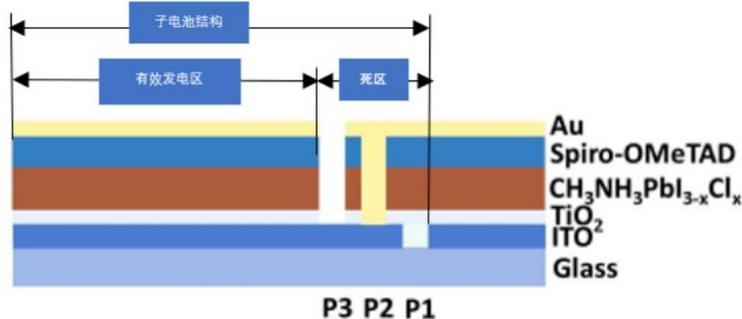


资料来源：wind，安信证券研究中心

## 5.5 基于激光法实现串联结构，建议关注激光相关公司

钙钛矿电池需通过串联结构满足电压要求，激光划线为主流工艺。钙钛矿模组制备过程中，需要将钙钛矿电池分割成多节子电池，前一个电池的金属电极与后一个电池的透明导电电极串联，使模组具备充足电压。分割划线有机械刻蚀、化学刻蚀、激光刻蚀等方法，由于激光刻蚀精度高、死区小、综合成本低等优势，目前已成为钙钛矿模组划线主流工艺。同时，激光工艺还用于钙钛矿电池功能层边缘清边等用途。

图：激光设备在钙钛矿模组制备过程中的作用及激光设备相关供应商



工序	具体作用/流程
P0激光打标	激光打标
P1激光划线	TCO层划线定义底电极
P2激光划线	钙钛矿层、HTL层（正式结构）制备后，划线HTL层、钙钛矿层、ETL层
P3激光划线	金属电极层制备后，划线金属电极层、HTL层、钙钛矿层、ETL层
P4激光清边	制备过程中印刷或生长方式涂布的各个层级存在误差，尤其边缘区域难以把控，需利用激光刻蚀技术在边缘清理出空区，保证电池各个层级一致性

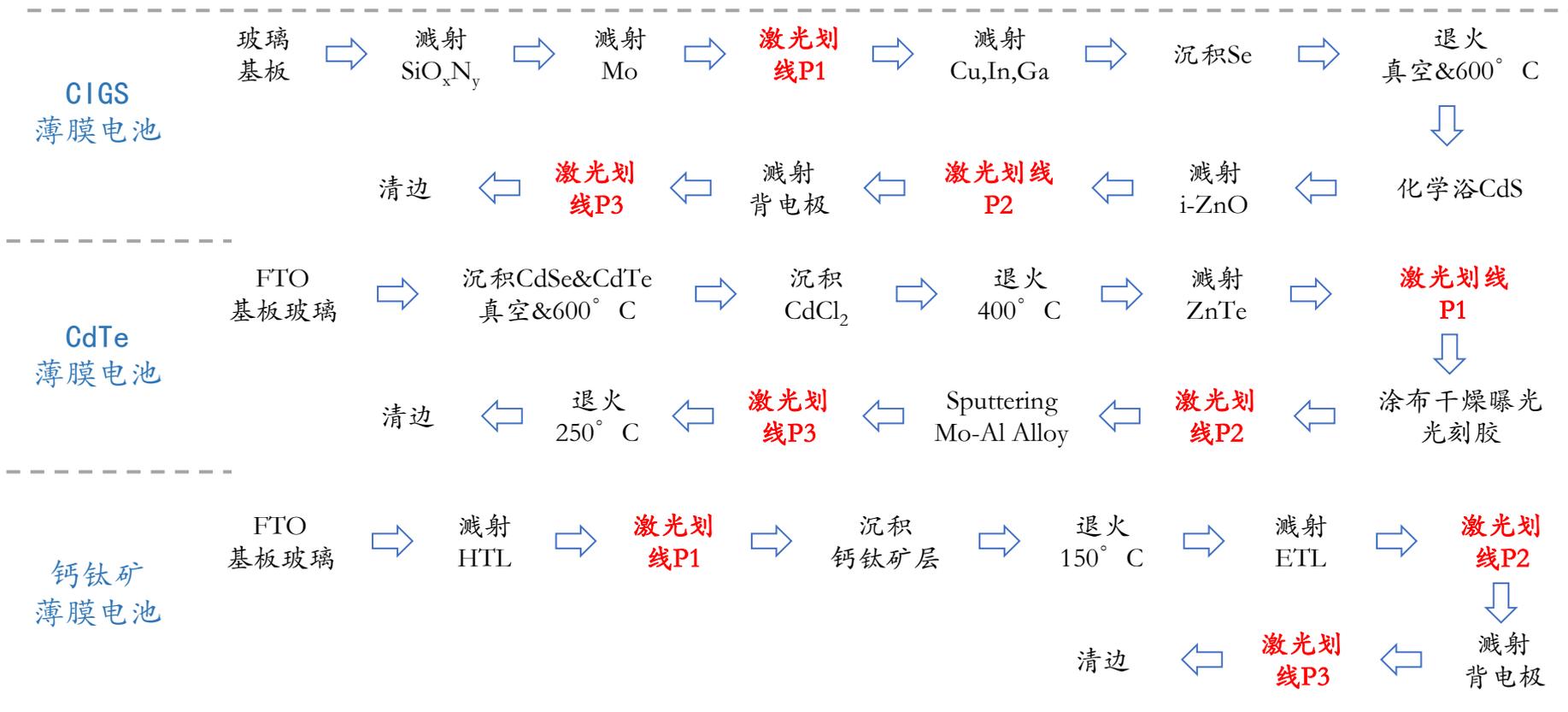
公司	相关进展
德国乐普科	自2006年成立以来，一直专注于为薄膜太阳能电池行业研制激光划线系统，是全球薄膜太阳能激光划线领域的技术与市场领导者；目前已为全球薄膜光伏客户提供了250余台激光划线系统，当前在运行设备总产能超过12GW，市场占有率超过90%。
迈为股份	2021年H1即已交付匿名客户钙钛矿单结电池激光设备
帝尔激光	目前公司的激光设备在钙钛矿太阳能电池TCO层、钙钛矿层、电极层的生产制程中均有应用，已有相关订单的交付。
杰普特	钙钛矿激光设备推出二代产品方案，涵盖P1-P3薄膜划切工艺段及P4清边工艺四台设备及前后小型自动化设备。
大族激光	2022年9月发布，公司在钙钛矿技术领域自主研发了钙钛矿激光刻划设备，已实现量产销售
德龙激光	公司推出了针对钙钛矿薄膜太阳能电池生产整段设备（P0-P4），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	截至2021年底已出货钙钛矿激光划线刻蚀设备50台套

资料来源：LPKF，元禄光电，各公司公告、官网、官微，东方财富，安信证券研究中心

## 5.5 基于激光法实现串联结构，建议关注激光相关公司

钙钛矿电池用激光工艺、激光设备与其他薄膜电池存在较大相似性，但要求更高。以加工精度为例，CIGS、CdTe薄膜电池激光刻蚀为微米级别，其中CIGS约3-5um，CdTe约2um，而钙钛矿电池则要求约0.3-0.5um，加工精度更高，若直接沿用，难以实现最优状态。

图表：三种薄膜电池激光工艺流程对比



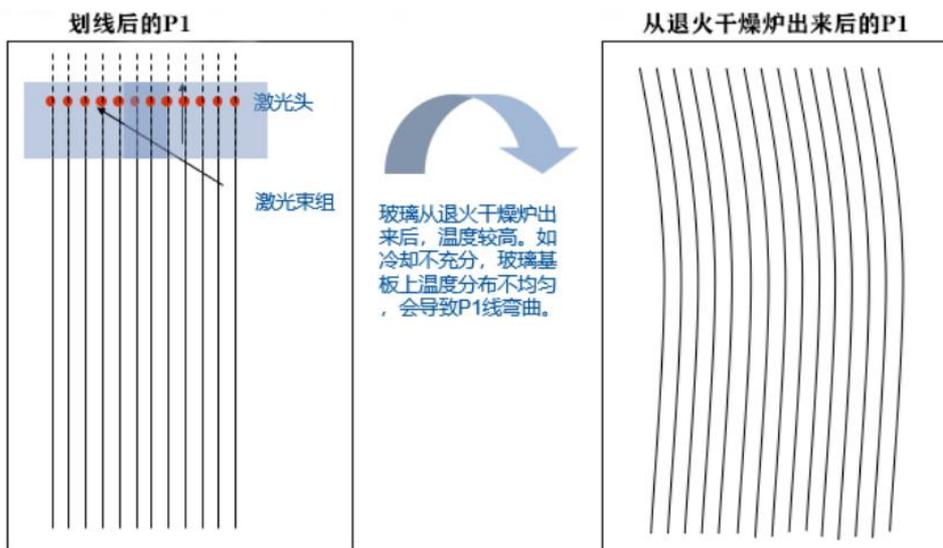
资料来源：LPKF，安信证券研究中心整理绘制

## 5.5 基于激光法实现串联结构，建议关注激光相关公司

如何减小死区是钙钛矿电池激光工艺未来主要发展方向。死区是P1线最外侧到P3线最外侧的区域不能发电，俗称死区。由于子电池宽度一定，死区越小，有效发电面积越大，模组效率越高。根据LKPF，以1m\*2m、子电池宽度0.5cm、有效面积效率18%的钙钛矿模组为例，当死区由250um降至130um时，每块模组输出效率可增加8.47瓦，相当于每块模组多卖17元RMB。而由于钙钛矿自身工艺限制，激光设备的划线精度、直线度以及设备对应的设计理念等将是减小死区的关键。

图：钙钛矿电池激光划线工艺难点

图：死区的计算公式与影响测算



死区的计算公式：

死区=P1线宽+P2线宽+P3线宽+P1线边缘到P2线边缘距离  
+P2线边缘到P3线边缘距离

模组长度(米)	模组宽度(米)	子电池宽度(cm)	死区宽度(cm)	子电池数量	总死区面积(cm <sup>2</sup> )	发电面积增加(cm <sup>2</sup> )	有效面积转换效率	每块模组功率增加(瓦)
2	1	0.5	0.025	196	980	470.4	18%	8.4672
2	1	0.5	0.013	196	509.6			

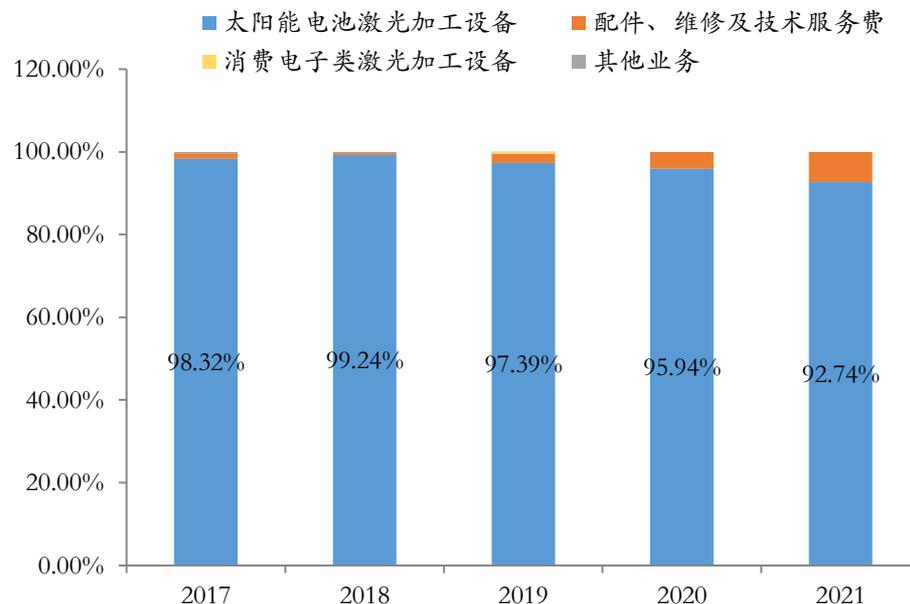
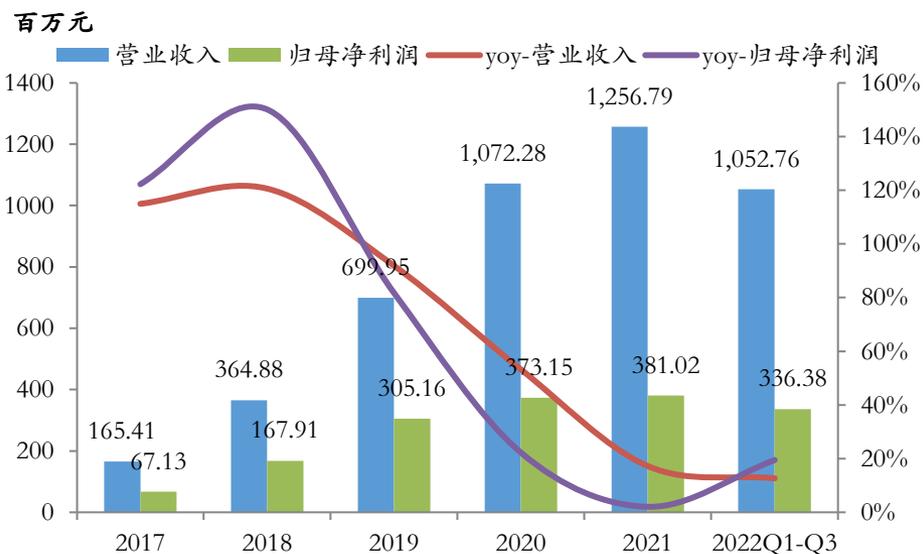
资料来源：苏州钙钛矿太阳能电池学术与产业化论坛，安信证券研究中心

## 5.5 基于激光法实现串联结构，建议关注激光相关公司

**帝尔激光：**光伏主要技术路线实现全覆盖，已有钙钛矿相关订单交付。公司成立于2008年，主要产品包括PERC激光消融设备、SE激光掺杂设备、激光扩硼设备等，并实现PERC、MWT、IBC、HJT、钙钛矿等光伏主要技术路线全覆盖，其2017-2021年营业收入CAGR为66.03%，归母净利润CAGR为54.35%。公司始终保持光伏激光设备领域领先地位，其PERC激光消融和激光掺杂SE设备市占率约80%。目前公司的激光设备在钙钛矿太阳能电池TCO层、钙钛矿层、电极层的生产制程中均有应用，已有相关订单的交付。

图表：营业收入、归母净利润及其增速

图表：历年细分业务收入占比



资料来源：wind，安信证券研究中心



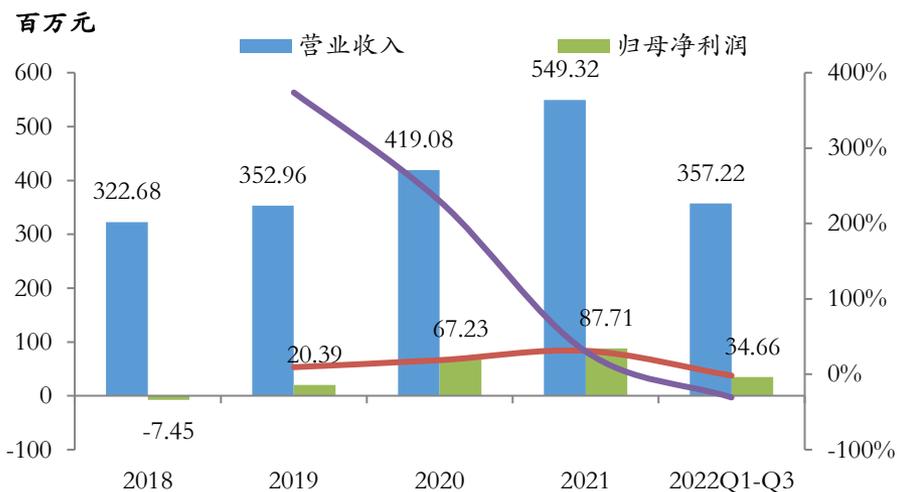
安信证券  
ESSENCE SECURITIES

资料来源：wind，安信证券研究中心

## 5.5 基于激光法实现串联结构，建议关注激光相关公司

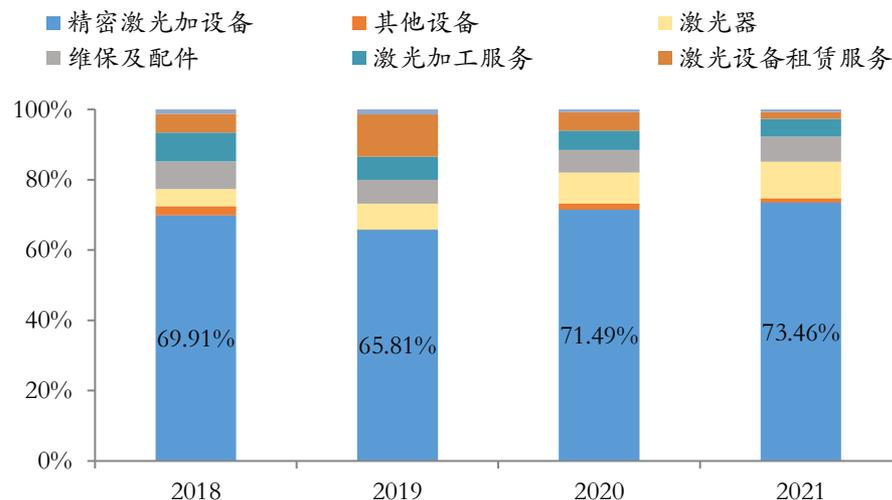
**德龙激光：薄膜电池领域十余年积累，率先助力百MW级钙钛矿电池产线量产。**公司成立于2005年，是业内领先的激光加工设备及激光器制造商，下游涉及半导体及光学、显示面板、消费电子、科研等领域，目前已拥有纳秒、皮秒、飞秒及可调脉宽系列固体激光器的核心技术，半导体领域已进入华为海思、中芯国际、长电科技等供应链。根据CINNO Research 统计，公司2020年中国大陆泛半导体激光设备销售额中排名第三，市占率15%，仅次于日本 DISCO 公司和大族激光。公司2009年即已推出非晶硅薄膜电池激光刻蚀设备，有相关深厚技术储备及工艺沉淀，2020年公司推出钙钛矿薄膜电池整段设备（P0-P4），目前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：营业收入、归母净利润及其增速



资料来源：wind，安信证券研究中心

图表：历年细分业务收入占比



资料来源：wind，安信证券研究中心

## 小结

**投资主线一：**有别于部分市场人士认为的钙钛矿单结电池将率先产业化，我们基于产业化可行性，推荐钙钛矿/晶硅叠层方向，将欲取之，必先予之，先融入晶硅产业链再反客为主（主要解决大面积问题，且双结比钙钛矿单结电池效率要高，驱动力量转变，晶硅电池发展到一定阶段会自发向晶硅/钙钛矿叠层延伸），优选在薄膜工艺领域有深厚沉淀的公司迈为股份、捷佳伟创和微导纳米。

**投资主线二：**有别于部分市场人士看好的湿法工艺，我们基于光伏制造面板化、钙钛矿成膜工艺结晶动力学与形貌优化，认为产业化将经历先有再优的过程，从湿法工艺走向干法工艺，建议关注奥来德，京山轻机。

**投资主线三：**有别于部分市场人士看好的设备方向，我们基于基底材料与吸收层的分离，电池片结构及工艺变化带来成本结构变化，第一大成本基底材料变化，关注品类集中的TCO环节，以钙钛矿单结电池0.2元/W的成本，则投产10GW理论市场扩容约20亿人民币，建议关注金晶科技。

**投资主线四：**有别于部分市场人士认为组件端价值量将下降，我们基于钙钛矿晶体对水分、氧气、紫外线和温度非常敏感，封装功能性意义更凸显，且可替代性低，建议关注层压机相关公司。

**投资主线五：**我们基于激光工艺分歧较少，且对钙钛矿模组制备至关重要，建议关注组件层压机设备企业德龙激光、帝尔激光。

## 5.6 风险提示

- ①钙钛矿商业化进程不及预期；
- ②钙钛矿电池领域市场竞争加剧；
- ③钙钛矿电池部分原理性及工程性问题涉及专业及专业未知领域，市场研究层面可能带来认知偏差；
- ④为方便广大投资者理解本研究语言表述不符合学术规范

# 谨以此研究献给所有为梦想追光的人!

欢迎联系【安信机械团队】

郭倩倩

安信机械首席分析师，山东大学金融学硕士，曾就职于南华基金、方正证券，紧密跟踪工程机械、锂电设备、轨交等行业，与各大公募、保险、私募、银行理财子公司等机构客户关系密切。市场口碑好，2022年水晶球公募榜第一。联系方式：**15601091677**



安信机械高级分析师，南京航空航天大学工学硕士，7年机械自动化研究及实业经验，曾就职于汇川技术担任研发工程师，深耕泛工业自动化领域。联系方式：**18926085297**

李疆



范云浩

安信机械高级分析师，北京大学计算机技术硕士，曾就职于方正证券、华安证券研究所、重点覆盖光伏、风电、储能及半导体相关设备领域，擅长产业研究。联系方式：**13718332803**



# 公司评级体系

## ■ 公司评级体系

### 收益评级：

领先大市 — 未来6个月的投资收益率领先沪深300指数10%及以上；

同步大市 — 未来6个月的投资收益率与沪深300指数的变动幅度相差-10%至10%；

落后大市 — 未来6个月的投资收益率落后沪深300指数10%及以上；

### 风险评级：

A — 正常风险，未来6个月投资收益率的波动小于等于沪深300指数波动；

B — 较高风险，未来6个月投资收益率的波动大于沪深300指数波动；

# 分析师声明

## ■ 分析师声明

本报告署名分析师声明，本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，勤勉尽责、诚实守信。本人对本报告的内容和观点负责，保证信息来源合法合规、研究方法专业审慎、研究观点独立公正、分析结论具有合理依据，特此声明。

## ■ 本公司具备证券投资咨询业务资格的说明

安信证券股份有限公司（以下简称“本公司”）经中国证券监督管理委员会核准，取得证券投资咨询业务许可。本公司及其投资咨询人员可以为证券投资人或客户提供证券投资分析、预测或者建议等直接或间接的有偿咨询服务。发布证券研究报告，是证券投资咨询业务的一种基本形式，本公司可以对证券及证券相关产品的价值、市场走势或者相关影响因素进行分析，形成证券估值、投资评级等投资分析意见，制作证券研究报告，并向本公司的客户发布。

# 免责声明

本报告仅供安信证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因为任何机构或个人接收到本报告而视其为本公司的当然客户。

本报告基于已公开的资料或信息撰写，但本公司不保证该等信息及资料的完整性、准确性。本报告所载的信息、资料、建议及推测仅反映本公司于本报告发布当日的判断，本报告中的证券或投资标的价格、价值及投资带来的收入可能会波动。在不同时期，本公司可能撰写并发布与本报告所载资料、建议及推测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息及资料保持在最新状态，本公司将随时补充、更新和修订有关信息及资料，但不保证及时公开发布。同时，本公司有权对本报告所含信息在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。任何有关本报告的摘要或节选都不代表本报告正式完整的观点，一切须以本公司向客户发布的本报告完整版本为准，如有需要，客户可以向本公司投资顾问进一步咨询。

在法律许可的情况下，本公司及所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券或期权并进行证券或期权交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务，提请客户充分注意。客户不应将本报告为作出其投资决策的惟一参考因素，亦不应认为本报告可以取代客户自身的投资判断与决策。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的投资建议，无论是否已经明示或暗示，本报告不能作为道义的、责任的和法律的依据或者凭证。在任何情况下，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。

本报告版权仅为本公司所有，未经事先书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发表、转发或引用本报告的任何部分。如征得本公司同意进行引用、刊发的，需在允许的范围内使用，并注明出处为“安信证券股份有限公司研究中心”，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

本报告的估值结果和分析结论是基于所预定的假设，并采用适当的估值方法和模型得出的，由于假设、估值方法和模型均存在一定的局限性，估值结果和分析结论也存在局限性，请谨慎使用。

安信证券股份有限公司对本声明条款具有惟一修改权和最终解释权。

# 公司地址

安信证券研究中心

深圳市

地址： 深圳市福田区福田街道福华一路19号安信金融大厦33楼

邮编： 518026

上海市

地址： 上海市虹口区东大名路638号国投大厦3层

邮编： 200080

北京市

地址： 北京市西城区阜成门北大街2号楼国投金融大厦15层

邮编： 100034