

光伏 0-1 的颠覆性技术，设备跨界+多工艺并存

2023 年 04 月 06 日

➤ **钙钛矿是光伏领域 0-1 的颠覆性技术，具有转换效率高+低成本的优点。**钙钛矿电池是第三代新型太阳能电池，是最具潜力和颠覆性的新一代光伏技术。其中的钙钛矿材料 ABX₃ 是有机金属三卤化物，具有非常优异的光电性质。**1) 钙钛矿材料带隙可调节，理论效率高：**钙钛矿是人工合成的材料，根据不同的材料配比，带隙可以调节，并可以与晶硅做成叠层电池，就可以覆盖大范围带隙，因而能够吸收不同波长的光。**2) 材料、工序简单，成本低：**相比晶硅，钙钛矿工序大大缩短，单 GW 投资更低。钙钛矿电池厂本身就相当于组件厂，省去了晶硅电池前端的硅料提纯、硅片切割等环节，整体生产成本上相较晶硅电池可大幅降低。同时钙钛矿的材料采用常见的物质人工合成，相比硅料价格更低。

➤ **钙钛矿电池的核心层“钙钛矿层”主要包括两类镀膜方法，总量上湿法占比更高，趋势上干法近 2 年上升更明显。**目前钙钛矿层薄膜的制备主要有溶液法、气相法两类工艺，可单独或组合使用。我们通过统计专利布局、钙钛矿电池&设备公司公开新闻角度分析目前两种工艺的实际进度与发展趋势。**1) 总量：**湿法相关专利最多且发展时间较长，2014 年就有相关专利；干法专利数和发展时长次之，干湿结合法相关专利最少且最新，2021 年首次出现。**2) 趋势：**2021/2022 年钙钛矿企业相关专利布局总数热度回升，其中湿法相较 2018-2020 年的平均水平差异不大，但干法相关专利数相较 2018-2020 年的平均水平有较大幅度的上升，同时 2021 年开始首次出现了干湿法相结合的专利布局。目前来看不同薄膜制备方法仍处于**两种技术并存发展的状态**。

➤ **钙钛矿适配叠层的优势需要被重视。**受益于可捕捉和转换更宽光谱范围，钙钛矿与晶硅叠层电池拥有更高的转换效率。连续可调的带隙宽度使得钙钛矿适合做叠层多结电池，与其他电池集成以后可以捕捉和转换更宽光谱范围的太阳光，获得比单纯晶硅电池或钙钛矿电池更高的光电转化效率。EcoMat 研究表明钙钛矿/硅串联太阳能电池的理论效率极限为 46%，远高于传统晶硅电池；而根据 NREL 统计的最新实验室数据，钙钛矿/晶硅叠层转化效率快速提升，超过单晶硅电池。

➤ **各类工艺路径的选择仍在快速迭代中，产品布局更全的设备公司更具优势。**加入统计非上市公司，涂布、各类真空镀膜（磁控溅射 PVD、真空蒸镀、RPD、ALD）均有若干专业玩家，具备跨界进入钙钛矿行业的技术储备（涂布来自锂电/平板显示、真空镀膜来自 OLED）。同时加入关注叠层后，各家公司对钙钛矿各层薄膜的制备均有不同的技术路线选择，各类工艺也均有自身的优缺点。光伏行业的一大特点是技术迭代迅速，早期投资产线押注某一当下最成熟的技术也可能被弯道超车（已投产线的技术可能会迅速被更新的技术取代）。在此背景下，我们认为当前更具备竞争实力的是产品线更为齐全的公司，以应对上述不确定性。同时，相比晶硅电池，钙钛矿电池的特点是原材料占比低，因此钙钛矿产业链上设备环节的议价能力有望更强。

➤ **投资建议：**钙钛矿单结、钙钛矿/晶硅叠层电池仍处于选定设备、工艺，多技术路线并存阶段，未来最终工艺或技术路线的选择仍有不确定性，但设备环节均会围绕着各类涂布设备、真空镀膜设备进行选择，不会离开此范围。建议关注各环节设备布局最全面的：**京山轻机、捷佳伟创**。同时关注奥来德、曼恩斯特（未上市）、汇成真空（未上市）等

➤ **风险提示：**1) 钙钛矿企业融资不如预期；2) 大面积制备时转换效率提升不及预期；3) 钙钛矿/晶硅叠层电池发展不及预期

推荐

维持评级



分析师 李哲

执业证书：S0100521110006

电话：13681805643

邮箱：lizhe_yj@mszq.com

分析师 占豪

执业证书：S0100522090007

电话：15216676817

邮箱：zhanhao@mszq.com

相关研究

- 1.一周解一惑系列：涂布机及涂布模头应用场景及市场空间展望-2023/04/02
- 2.一周解一惑系列：全球数控系统演进简史与中国国产化之路-2023/03/26
- 3.一周解一惑系列：制氢电解槽先行，氢能产业发展有望提速-2023/03/19
- 4.机械行业中国特色估值体系研究专题报告：设备央国企，吹响集结号-2023/03/18
- 5.一周解一惑系列：掘进机装备行业及产业链梳理-2023/03/13

目录

1 钙钛矿：光伏领域 0-1 的颠覆性技术	4
1.1 优点 1：带隙可调带来更高的理论转化效率	4
1.2 优点 2：原料易获取、工序简单带来成本降低	5
2 什么是溶液涂布	6
2.1 溶液涂布的主要技术路线	6
2.2 涂布工艺流程	7
2.3 狭缝涂布设备	9
3 什么是真空蒸发镀膜	14
3.1 真空镀膜的基本原理	14
3.2 真空蒸发镀膜的工艺流程	15
3.3 真空蒸发镀膜设备的商业化进程	16
4 钙钛矿层薄膜制备	20
4.1 钙钛矿层薄膜制备方法	20
4.2 技术最新进度：专利布局、公开新闻	23
4.3 钙钛矿层制备的工艺难点	25
4.4 涂布、蒸镀对比总结	26
4.5 钙钛矿整线其他层设备选择	31
5 钙钛矿应用：钙钛矿/晶硅叠层电池	34
5.1 晶硅叠层钙钛矿电池以及研发背景	34
5.2 学术界进度汇总	40
5.3 产业进度汇总	44
6 对未来的思考：跨界与并存	48
6.1 半导体光刻胶	48
6.2 OLED 显示	50
6.3 锂电池	51
6.4 当前钙钛矿产线各层镀膜仍是多工艺并存发展	52
7 相关标的	53
7.1 京山轻机	53
7.2 捷佳伟创	57
7.3 奥来德	58
8 风险提示	61
插图目录	65
表格目录	66

➤ **我们的不同：为什么更看好产品线布局更全，接近整线的钙钛矿设备公司**

1、钙钛矿的适配叠层属性，特别是钙钛矿/晶硅叠层的关注度应该提升

钙钛矿早期由创业公司驱动，且钙钛矿各层薄膜的制备工艺尚不成熟，因此更多的讨论和关注度集中在钙钛矿单结电池上。但钙钛矿的另一大特点是带隙可调，适配叠层，并且叠层电池具备更高的转换效率，符合光伏降本增效的第一性原则。特别的，当前实验室阶段钙钛矿/晶硅叠层拥有最高的转换效率，同时站在晶硅企业角度，如果钙钛矿各层的制备相对成熟后，对于他们来说晶硅产线是沉没成本，这点与钙钛矿创业公司并不相同。基于此我们认为随着钙钛矿单结制备的成熟度日益提高，钙钛矿/晶硅叠层的关注度应该提升，也应该更加重视适配该技术路线的对应设备。

2、技术跨界的难度，涂布与真空镀膜设备有差异，会暂时影响当前设备格局

钙钛矿的涂布设备更接近于平板涂布制备光学薄膜，而市面上更多的涂布公司聚焦在锂电行业，相比锂电涂布，钙钛矿行业的基底不同，镀膜更薄，材料更复杂且均匀性要求更高，因为跨界难度相对更大。而对于真空镀膜设备，难点在于对各类不同靶材的理解以及根据成膜需求选用哪种镀膜工艺，钙钛矿的靶材和工艺更接近于 OLED 产业，已有相对成熟的真空镀膜公司，因此该类设备平移至钙钛矿行业进行跨界的难度相对更小。不同的跨界难度，会暂时影响各个环节设备，当下在钙钛矿领域的市场。

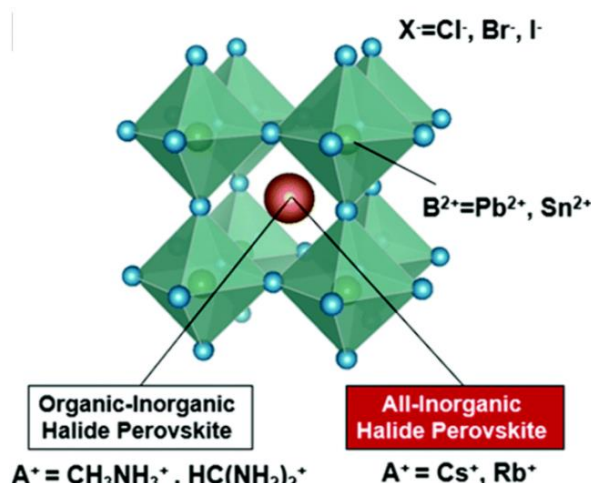
3、单个设备的竞争格局，各类工艺路径的选择仍在快速迭代中

加入统计非上市公司，涂布、各类真空镀膜（磁控溅射 PVD、真空蒸镀、RPD、ALD）均有若干专业玩家，具备跨界进入钙钛矿行业的技术储备。同时，加入关注钙钛矿/晶硅叠层电池后，各家公司对钙钛矿各层薄膜的制备均有不同的技术路线选择，各类工艺也均有自身的优缺点。光伏行业的一大特点是技术迭代迅速，早期投资产线押注某一当下最成熟的技术可能适得其反（因为已经投产产线的技术可能会迅速被更新的技术取代）。在此背景下，我们认为当前更具备竞争实力的是产品线更为齐全的公司，以应对上述不确定性。同时，相比晶硅电池，钙钛矿电池的特点是原材料占比极低（不足 5%），因此钙钛矿产业链上设备环节的议价能力有望更强。

1 钙钛矿：光伏领域 0-1 的颠覆性技术

钙钛矿是指一类陶瓷氧化物柔性材料，呈立方体晶形。狭义的钙钛矿特指 CaTiO_3 ，广义的钙钛矿泛指与 CaTiO_3 结构类似的 ABX_3 型化合物，A 代表有机分子（一般为 CH_3NH_3 等），B 代表金属离子（一般为铅或锡），X 代表卤素离子（一般为氟、氯、溴、碘、砷）。利用钙钛矿型的有机金属卤化物半导体作为吸光材料的太阳能电池，则被称为钙钛矿型太阳能电池，钙钛矿电池属于一种非硅（薄膜）电池，目前用于太阳能电池发电层的钙钛矿材料一般为有机-无机杂化钙钛矿材料。

图1：钙钛矿正八面体晶体结构图



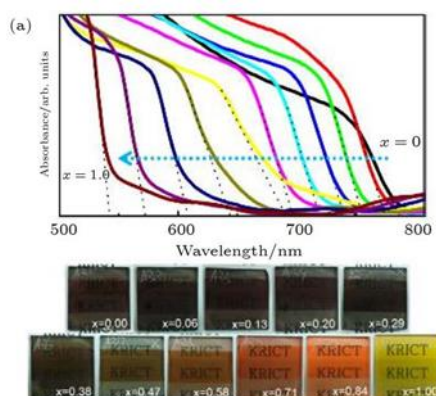
资料来源：澎湃《能创无限 | ABX_3 钙钛矿？没钙无钛不是矿！》，民生证券研究院

钙钛矿电池是第三代新型太阳能电池，是最具潜力和颠覆性的新一代光伏技术。其中的钙钛矿材料 ABX_3 是有机金属三卤化物，具有非常优异的光电性质，如光学带隙可调(1.1~2.3eV)、吸收系数高、载流子扩散长度大等特点。同时具有原材料丰富、缺陷容忍度高、材料成本低等优点。

1.1 优点 1：带隙可调带来更高的理论转化效率

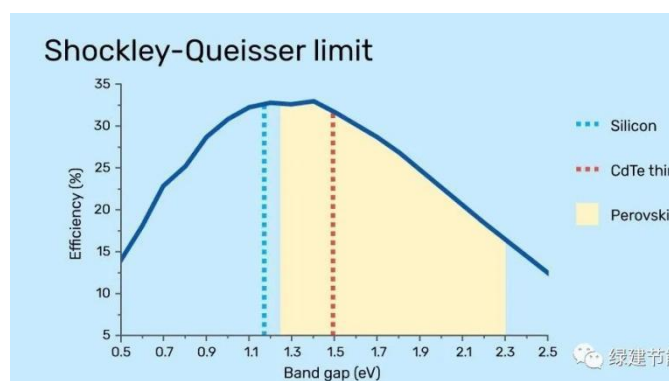
钙钛矿材料带隙可调节，理论效率高。钙钛矿是人工合成的材料，根据不同的材料配比，带隙可以调节，并可以与晶硅做成叠层电池。带隙是半导体可以吸收的最低能量，半导体无法吸收能量小于带隙的光子，能从光子获得的能量也不会超过带隙能量。钙钛矿材料带隙可调节，与晶硅材料或者经过人工调整的钙钛矿材料叠层后，就可以覆盖大范围带隙，因而能够吸收不同波长的光。目前单结钙钛矿电池理论效率为 31%，与晶硅叠层理论效率超过 43%。

图2：钙钛矿电池带隙调节



资料来源：《铅卤钙钛矿敏化型太阳能电池的研究进展》，民生证券研究院

图3：不同带隙对应光伏电池的转换效率

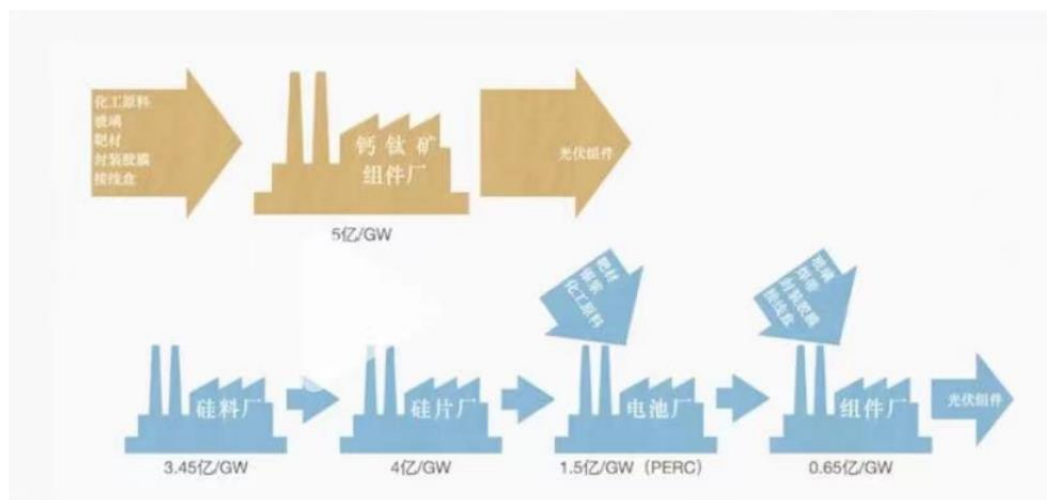


资料来源：碳中和学习与实践，民生证券研究院

1.2 优点 2：原料易获取、工序简单带来成本降低

相比晶硅电池，钙钛矿工序大大缩短，单 GW 产能投资额更低。于钙钛矿电池厂本身就相当于组件厂，同时也省去了晶硅电池前端的硅料提纯、硅片切割等环节，整体生产成本上相较晶硅电池可大幅降低。根据协鑫光电的数据，晶硅电池的制备，从硅料到组件至少经过 4 道工序，单位制程需要 3 天以上，同时还需要大量人力、运输成本等；而钙钛矿组件在单一工厂完成生产，原材料经过加工后直接成组件，没有传统的“电池片”工序，大大缩短制程耗时。

图4：钙钛矿电池和晶硅电池生产成本比较



资料来源：华尔街见闻协鑫光电访谈，民生证券研究院

2 什么是溶液涂布

2.1 溶液涂布的主要技术路线

1) 刮刀涂布法

刮刀涂布法是一种利用刮刀与基底的相对运动,通过刮板(半月板)将前驱体溶液分散到预制备基底上的一种液相制膜方法。其中,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。

2) 狭缝涂布法

狭缝涂布法是一种将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。

狭缝涂布法有如下几个特点。首先,目标液膜的参数可以通过控制系统的参数设定进行精确的数字化设计。例如,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、储液泵给料速度、风刀压力大小等进行预设。其次,该方法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。最后,该技术可以将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。而且,这样的密闭环境可以保证实验人员的安全、有效地隔离人与有机溶剂的接触。

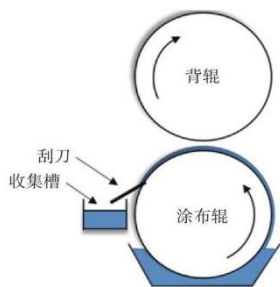
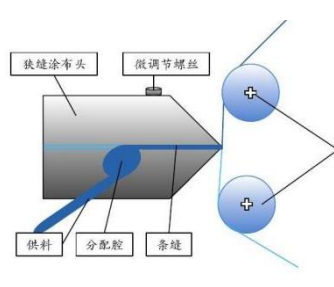
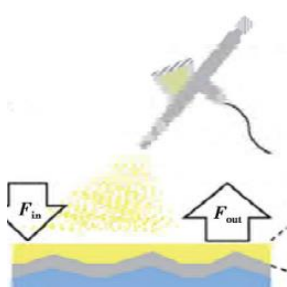
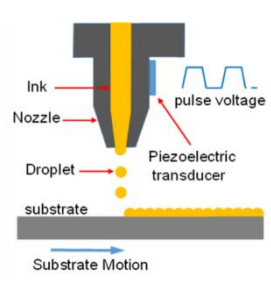
3) 喷涂法

喷涂法是一种通过对喷枪内的前驱液施加压力,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。该方法是一种易于扩展的大面积薄膜沉积技术。典型的喷涂系统包括用于存储溶液的压力罐、气动喷嘴和热板。一般来讲,按照喷涂的动力来源可将其分为三类,即气动喷涂(动力来源:高压气体)、超声喷涂(动力来源:通过超声波震动)以及电喷涂(动力来源:通过电斥力)。

4) 喷墨打印法

喷墨打印法是通过控制打印腔内压力的变化将前驱体墨水从打印头喷出并打印到预沉积基底上的一种薄膜沉积方法。该方法也是一种非接触式的薄膜沉积技术,喷嘴与基底之间没有机械应力,而且对墨水的粘度要求较低,这极大地提高了该沉积技术本身对基底材料的强度和表面粗糙度的容忍度。当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。这样,沉积前预先设计的图案即被直接印刷在基底上,省去了制版等过程,提高了原料的利用率。

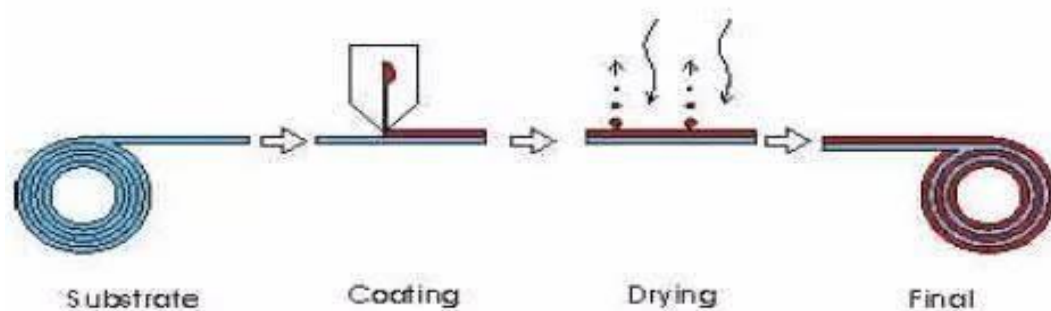
表1：溶液涂布主要方法示意图

	刮刀涂布	狭缝涂布	喷涂法	喷墨打印
设备原理图				
优点	表面平整,可适用高固量(50%-65%) 涂料,成膜质量高,工艺稳定,可大面积制备,生产速度快。	膜厚一致性好,原料利用率高,液膜厚度范围薄且更为精确,可重复性高,对基底平整度要求一般,可大面积制备,溶液粘度范围大,速度快。	可大面积制备; 超声喷涂具有涂层均匀度高、原料利用率高、涂层厚度控制精度高、涂层厚度更薄、飞溅少、喷头不堵塞、维护成本低等优点; 电喷方式液剂的使用效率高,液体可精准附于基材。	可大面积制备; 无需制版(掩膜), 省去了制版花费的时间及成本; 可通过 CAD 数据生成图样; 支持微少量、精密图样涂布; 对基材容忍度高。
缺点	膜厚一致性一般,刮刀损耗大,溶液粘度要求高,原料利用率较低,对基底平整度要求高,可重复性一般,连续时间短。	设备成本高; 对操作人员技术知识要求高; 安装和操作要求高; 涂布头精度高; 维护成本高。	喷涂到载体上的颗粒大小、高度和均匀度相对难以把控; 需要额外外掩膜版; 空气喷涂中的涂液飞溅较多,容易发生材料损耗。	部分材料浪费; 传统喷墨面临喷嘴堵塞问题; 可实现多喷头同时打印,但是薄膜结晶速率难以把握。
适用场景	短时间生产,对于膜层要求一般。	膜层薄、一致性要求高,可连续生产。	较大面积制备,可根据精度、均匀度需要选择不同喷涂方式。	对精度要求高,图样丰富。

资料来源：《大面积钙钛矿薄膜制备技术的研究进展》，基恩士中国官方网站，民生证券研究院

2.2 涂布工艺流程

图5：涂布工艺流程简化示意图：放卷-涂布-烘干-收卷



资料来源：《台湾工研所：精密涂布技术介绍》，民生证券研究院

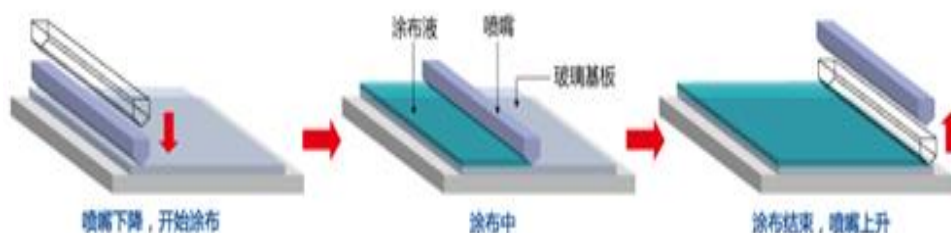
1) 放卷

放卷机构由放卷轴、过辊、接带平台、张力控制系统、放卷纠偏系统等组成。基材首先经放卷轴开卷，后经由过辊、接带平台以及张力检测辊进入涂布头。其中，过辊包括辊体和两个辊轴，用于带动基材绕动；接带包括手动，自动接带两种，用于料卷更新替换；放卷纠偏用于确保卷材在放卷过程中始终从预先设定的位置导出，以便准确进入下一工序。

2) 涂布

在这一环节，不同的涂布方式的体现的效果不同。对于狭缝涂布来说，从构造上看，涂布模头组合使用左右成对的“不锈钢主体”和“作为涂布口的硬质合金刀头”。工作时涂布液在一定压力、一定流量下经过过滤装置、传送装置后，沿着涂布模具的缝隙挤压喷出而涂布到基材上。

图6：狭缝涂布法涂布环节示意图

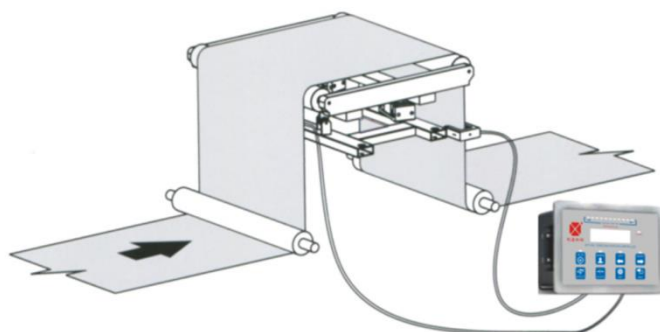


资料来源：《多图为您浅析常见的七大类涂布机》，民生证券研究院

3) 纠偏

通过纠偏装置修正卷材在向前运动中出现的侧边误差，确保在行进过程中的卷材始终从预先设定的位置经过，防止材料出现蛇形现象或进入下一工序时出现边缘不齐的情况。目前的检测模式一般有线扫与面阵相机两种。

图7：中间导向框架式纠偏应用示意图

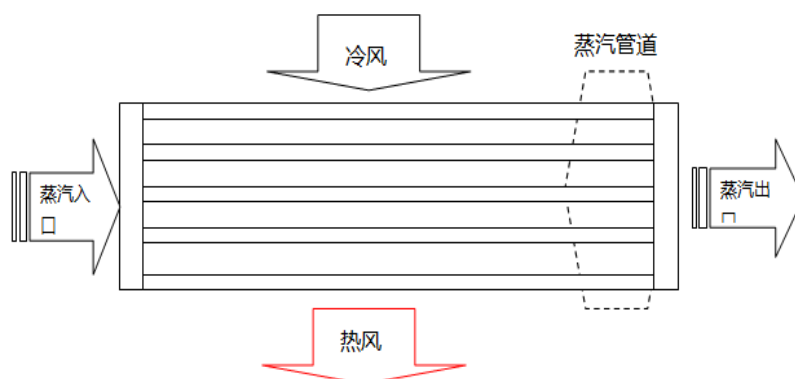


资料来源：《纠偏控制系统应用安装范例》，民生证券研究院

4) 烘烤

一般涂布结束之后需要通过烘烤硬化，烘烤是将外部的热量传导到电池极片，完成热交换的过程。对应的加热介质有热风(电加热、蒸汽加热、导热油加热)、红外、微波(严格意义属于波传导热)。

图8：蒸汽加热示意图



资料来源：锂电派，民生证券研究院

5) 收卷

烘干之后会进行面密度测试以及收卷纠偏，最后用卷筒卷取即收卷。其中面密度测量通常使用 β 射线或 X 射线穿过物体后衰减的强度进行测定，收卷纠偏用于确保在收卷过程中收料整齐。

2.3 狭缝涂布设备

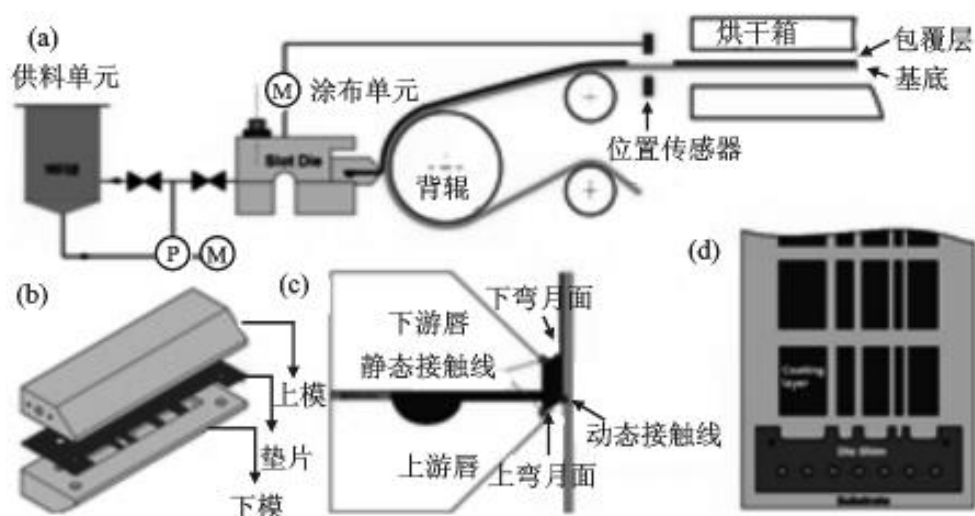
2.3.1 典型狭缝涂布设备

狭缝涂布设备主要由收-放卷系统、涂布系统、烘干系统几个部分组成。涂布系统主要包括供料单元和涂布单元，供料单元包括储料罐、输送泵、过滤装置等；涂布机构主要由控制涂布间隙的阀门系统、压力控制系统以及涂布头。涂布头由三部分组成：上模 (updie)、下模(downdie)以及安装在上模和下模之间的薄垫片。涂布过程，在压力作用下，涂液从上、下模之间的缝隙挤出，与移动的基材之间形成液珠并转移到基材表面，形成湿膜；液珠的形成是成膜的关键，液珠的关键参数包括：上、下弯月面的形成及其位置，静态接触线和动态接触线的位置。横向间隙主要由阀门控制，而 MD(MachineDirection)方向的间隙由 Shim 控制。

由于狭缝涂布技术对涂布头的模具精度要求极高，因此，SDC 设备所用涂布头模具大多以进口为主。根据涂布头调整方式，分为固定式和可调式。固定式模具是通过调整涂布间隙(唇口与背辊之间间隙)来调整涂布重量的均匀性；可调式是通

过调整上下唇口间缝隙来调整重量均匀性。条纹涂布一般均通过垫片形状实现。

图9：典型狭缝涂布设备



资料来源：《狭缝式涂布技术的研究进展》，民生证券研究院

2.3.2 狭缝涂布设备应用场景

1) 平板显示

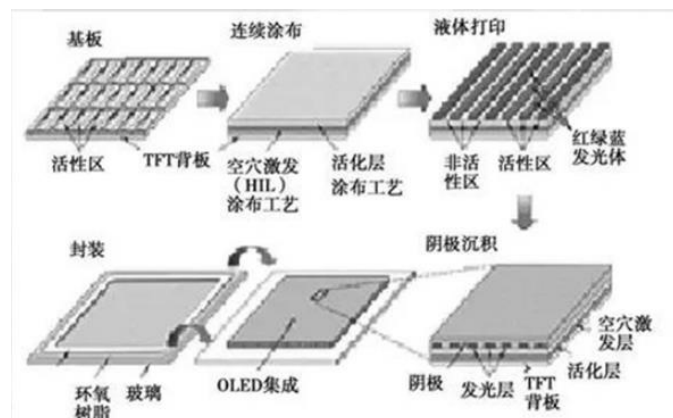
狭缝涂布技术可应用于平板显示领域如 LCD、OLED、mLED、QLED 等。在柔性 OLED 中，狭缝涂布技术可应用在多个方面，例如盖板 (UTG/CPI/HC)、触摸 (AgNW/CP)、电极 (TCF/CPI)、基板 (PI+TFT)、TFT 基板中的 PI 成膜与光刻胶涂布。

杜邦公司专利 US20070020395 中叙述了 OLED 电子发光器件的制造方法；在基材 ITO 导电层与发光层(EL)之间加入一层缓冲层(BufferLayer)以提高发光效率。将缓冲分散液(由聚次乙二氧基噻吩和聚全氟磺酸组成)涂布在已有导电层的玻璃基板上。为达到一定的厚度，采用旋涂方法需要 20ml 缓冲分散液；而采用狭缝涂布只需要 5ml 缓冲分散液，可大大节约原材料，充分显示了狭缝涂布工艺的优点。

2) 新能源电池

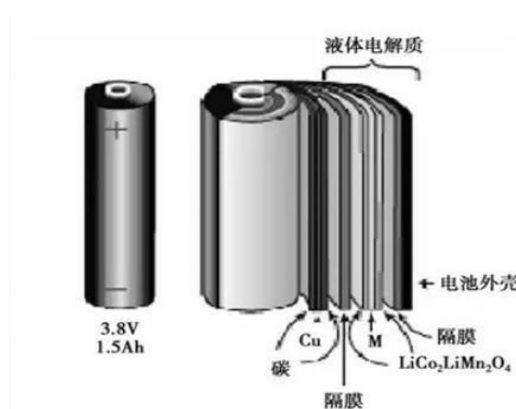
狭缝涂布技术对于新能源电池如钙钛矿、OPV、氢电池、锂电池等制造环节中起到重要作用，可以应用于质子交换膜、锂电池隔膜、HTL/ETL/perovskites 等。锂电池极片涂布工艺主要有刮刀式、辊涂转移式和狭缝挤压式等。一般实验室设备采用刮刀式，3C 电池采用辊涂转移式，而动力电池多采用狭缝挤压式。钙钛矿光活性层的制备工艺繁多一般可分为溶液制备法(湿法)和气相沉积法(干法)。旋涂法因成本低、操作方便广泛应用于实验室的小面积 PSC 器件；而对于大面积钙钛矿光活性层的制备，狭缝涂布法拥有其他湿法所不具备的突出优点(可连续生产、材料利用率高等)。

图10：杜邦公司涂液工艺制 OLED 彩色显示器流程



资料来源：Trendbank，民生证券研究院

图11：圆柱形锂离子电池结构图



资料来源：Trendbank，民生证券研究院

3) IC 先进封装

IC 板级封装（FO-PLP）是精密溶液成膜技术的新发展之一。目前许多产品已经采用该方法，例如奕斯伟在 510mm*515mm 上进行封装、佛智芯在 600mm*600mm 上进行封装。扇出大板级封装（FO-PLP）具有 4 个优势：性能优越、物理尺寸小、成本低、适应性高。而板级封装中间的核心设备之一就是狭缝涂布设备，扇出大板级封装的挑战在于芯片巨量转移至玻璃基板后会出现翘曲，但是可以解决该问题。

除此以外，狭缝涂布还可以用于制造光学膜（增亮膜、hardcoat、偏光膜、扩散膜等）。从以上简要介绍可以了解到，以涂层结构为特征的功能性材料，如 LCD 显示器中所用的各类光学薄膜、OLED 显示屏、OLED 照明器、电子显示纸、锂离子电池电极等产品中的功能性材料的研发、生产，都离不开精密涂布工艺的应用。

以狭缝涂布设备为代表的精密涂布设备中，国外涂布设备厂商在技术上占有领先优势，如美国 nTact、日本东丽工程和韩国三兴机械等，国内精密涂布设备以国外进口为主。但近年来国产化替代进程加速，尤其是在需求庞大、发展迭代速度较快的新能源电池产业，国内设备针对我国电池生产的工艺特点而研发制造，适应性强，性价比优势明显，已有国内公司突破国外厂商的垄断。如在我国已建和在建的 500MW 钙钛矿电池试量产线的涂膜设备供货中，德沪涂膜狭缝涂布设备 0.6m×1.2m 和 1m×2m 供货达 350MW，市占率 70%，而日本头部厂商作为唯一竞争对手，供货 150MW，占 30%。国内涂布设备供应商正在逐步打破高端技术被日、韩、欧、美垄断的局面。

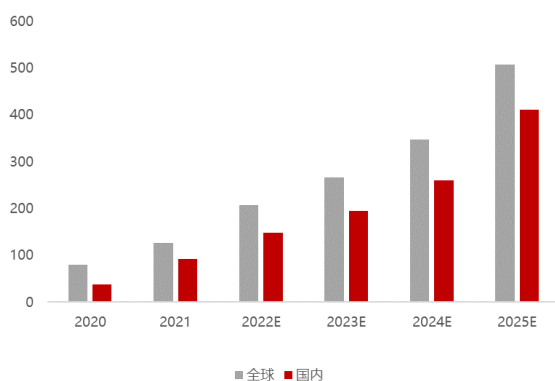
表2：涂布设备主要供应商

公司	所属国家	设备产品	公司介绍
德沪涂膜	中国	狭缝涂布设备	德沪涂膜狭缝涂布设备已供货大面积钙钛矿产线达 350MW，市占率 70%；在诸如平板显示（包括 LCD、OLED、柔性显示等）、光伏面板（如 CIGS、CdTe、OPV 等）、固态照明（OLED 和 LED）、各种如 FRID、聚合物电池、传感器等有机印刷电子应用领域，狭缝涂布系统和技术能实现高效、高性能无旋涂布
众能光电	中国	刮涂/涂布一体机	众能光电已对外销售刮涂/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
大正微纳	中国	狭缝涂布设备	公司拥有 DieGate 狭缝涂布机 mini 系列等狭缝涂布设备
科晶智达	中国	狭缝挤出式涂覆设备	公司经过十多年的积累，产品应用涵盖了石墨烯材料、先进陶瓷、先进纳米材料、锂离子电池、超级电容器、燃料电池、固态电池、钙钛矿太阳能电池、功能薄膜等方向
浩能科技	中国	涂辊分设备，包括高速双层挤压涂布机、双面隔膜涂布机等	浩能科技发布了一款自主研发的新型高速宽幅双层挤压式涂布机，拥有大量专利认证。在生产线上与日韩进口设备的 PK 中，该款新型涂布机以 120m/min 的速度超越了日韩 80m/min 的速度，实现了国产涂布机的逆袭。
雅康	中国	双层挤压涂布机，高速狭缝式挤压涂布机等	雅康专注锂电设备，铸就了涂布机、辊压机、分条机、制片机、卷绕机等具有国际品质、本土价格的系列化产品
日本东丽	日本	涂布机	-
三兴机械	韩国	光学薄膜涂布机、狭缝涂布机	-
nTact	美国	狭缝涂膜设备	长期深耕钙钛矿行业，是全球领先的钙钛矿涂膜设备企业。nTact 是全球最早聚焦发现和解决大面积和 Si-Tandem 钙钛矿涂膜遇到的技术挑战的精密涂膜设备公司，在美国、英国、德国、日本、韩国和中国都有客户，与德沪涂膜是商业合作伙伴

资料来源：各公司官网、公众号，民生证券研究院整理

目前涂布设备涉及多种领域如胶粘剂(包括特殊的透明胶粘剂)电池、陶瓷电容器、装饰表面、电子显示介质、过滤膜、地板、燃料电池、磁性泥浆、医疗产品、光阻材料、压敏胶带、太阳能电池、超导体、撕带和窗用薄膜等，使用范围多样化。以锂电池所在的市场为例，根据起点研究院（SPIR）调研数据预测，未来 3 年中国及全球的锂电池涂布设备市场规模将持续增加，至 2025 年中国规模可超过 400 亿。

图12：2020-2025 年中国及全球锂电池涂布设备市场规模预测趋势图（亿元）



资料来源：起点研究院（SPIR），民生证券研究院

3 什么是真空蒸发镀膜

3.1 真空镀膜的基本原理

真空镀膜是指在高真空条件下，利用各种物理或化学方法将靶材表面气化或电离，再沉积到基底表面形成薄膜。真空镀膜技术分为物理气相沉积（PVD）和化学气相沉积（CVD）。物理气相沉积法主要分为真空蒸发镀膜、真空溅射镀膜、真空离子镀膜。在钙钛矿层制备中，主流使用方法为蒸发镀膜，简称蒸镀法。

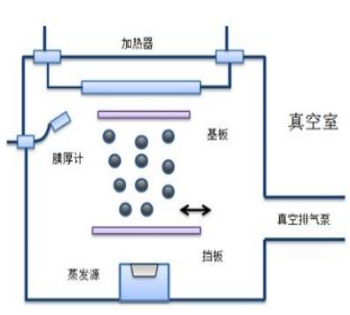
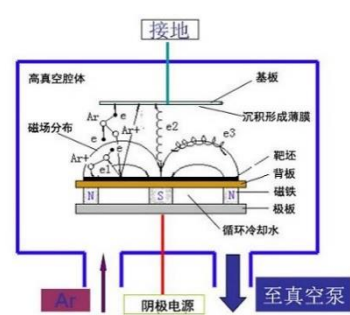
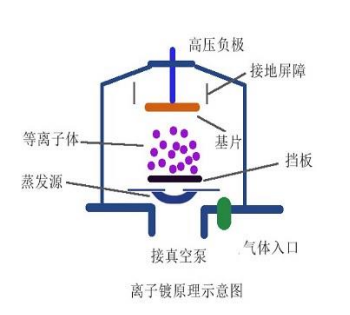
1) 蒸发镀膜：真空条件下，通过电阻加热、电子束轰击等方法使镀料靶材受热蒸发，靶材分子逸出，从镀料迁移到基片表面，沉积形成薄膜。

2) 溅射镀膜：真空条件下，向装置内充入氩气（Ar），高电压下氩气辉光放电，电离的氩离子在电场力作用下加速轰击放置在阴极的靶材，被溅射出的靶材分子沉积在基片表面形成薄膜。

3) 离子镀膜：真空条件下，通过等离子体电离技术离子化镀料靶材，靶材分子部分电离。基片外接高压负极。在深度负偏压下靶材分子向基片运动，沉积到基片表面形成薄膜。

真空蒸镀制备钙钛矿薄膜又包括共蒸法和分步连续蒸发法。共蒸法是将多种原材料同时蒸发到基底上，通过控制不同原料的蒸发速率来调控反应物的比例；分步连续蒸发法是将某一原料先沉积到基底上，然后沉积另一种材料，通过控制两种材料沉积的厚度来调控反应物的比例。

表3：真空镀膜技术对比

	蒸发镀膜	溅射镀膜	离子镀膜
设备原理示意图			
优势	设备简单，易于操作。成膜速率快，效率高。	大面积均匀性好，膜层密度、纯度较高，针孔少，膜厚可控性强，工艺重复性好。可镀膜材料广泛。	薄膜损伤小，镀层附着力强，绕度性好，能在形状复杂的零件表面镀膜。沉积速率高，成膜速度快。

劣势

真空度要求高，薄膜附着力较弱，工艺重复性一般，容器内壁易受污染

荷能粒子能量高，轰击力度大，造成薄膜损伤。设备结构复杂，靶材利用率低。

设备成本高。膜厚精确控制难，膜与集体间存在较宽过渡界面。较易形成空穴和空核。基板必须是导电材料。

适用场景

对生产速度、设备成本要求高，但不太追求膜密度、附着力、基板面积的场景。靶材蒸发温度通常低于 2000℃，沸点太高不适合蒸镀。靶材化学性质稳定，受热不易分解。

对薄膜面积、平整度、纯度、附着力要求高，注重工艺重复性，但不太追求靶材利用率的场景。

对膜密度、附着力、晶粒大小要求高，待镀器件表面复杂（存在凹槽、窄缝或内孔），能承受较高设备成本的场景。

工艺难点

蒸发源的加热性能、对蒸发速率的控制能力对薄膜厚度、均匀度影响大。

对基底造成损伤。靶材利用率低。难以处理多材料组分精密可控溅射。

电弧离子镀的可镀区域相对较小；磁控溅射离子镀的偏流密度有待提高。

资料来源：阿石创招股说明书，奥来德招股说明书，振华科技官网，民生证券研究院

3.2 真空蒸发镀膜工艺流程

真空蒸发镀膜工艺主要流程有：镀前准备，制备真空，烘烤，预熔，蒸发，后续处理等。

1) 镀前准备：

准备工序主要包括镀件清洗、蒸发材料制作、真空室及镀件夹具清洗、蒸发源与镀件安装等。

镀件清洗：膜层与镀件表面结合力是镀膜质量重要的指标，镀件表面若有油脂、吸附水、灰尘等则会降低膜层的结合力，影响表面均匀性，因此要预先通过化学涂油、静电除尘、涂底漆等方法进行表面清洁处理，增强薄膜附着性，降低表面粗糙度，提升薄膜质量。

蒸发材料制作：选取适当的蒸发材料是获得优质膜层的基本条件，选取材料的基本原则是：有良好的热稳定性和化学稳定性，机械强度高，内应力低，并有一定的韧性，与底漆结合性良好，反光率高，真空放气量小，饱和蒸汽压低等。制备含多种成分的薄膜时，需要提前计算各种蒸镀材料的用量和蒸发速率，以精确控制薄膜组分的化学计量比。不同的蒸发材料需选用相应的蒸发源和蒸镀方式。蒸发源可分为点源、线源、面源。常见的蒸发方式有电阻加热、电子束加热、感应加热、电弧加热、激光加热等。

真空室及镀件夹具清洗：蒸镀容器内壁易受靶材蒸汽污染。有内罩的真空室污染，可取下罩清洗或更新，若无内罩可先后用碳酸钙、蒸馏水擦拭，最后用无水乙醇擦净。铝夹具可先后用氢氧化钠溶液、稀硝酸、蒸馏水清洗。

蒸发源与镀件安装：蒸发源与电极应保持良好接触，镀件应平稳牢固安置在镀

件夹上，防止蒸发时因夹具旋转而将镀件抛离夹具。

2) 制备真空：

蒸镀必须在足够高的真空度下进行，这是因为：

真空度高有利于形成牢固的膜层。较高的真空度可以保证气化的靶材分子平均自由程大于蒸发源到基底的距离，靶材气体分子与容器内残余的气体分子之间几乎不发生碰撞，能保持较大动能达到基片表面，凝结成牢固的膜层。若真空度不高，靶材气体分子与残余气体分子之间产生碰撞，到达基片的能量不足，形成的薄膜附着性也会下降。

真空度高可以减少残余气体的污染。容器内的残余气体分子（氮、氧、水、碳氢化合物等）会混入已形成的薄膜中，使薄膜纯度下降，还会与蒸发源高温化和，减少其使用寿命。

制备真空时，通常使用机械泵对真空室进行抽气，随后进行离子轰击（清洁表面）。容器内真空度达到一定标准后，再启动扩散泵或分子泵，将容器抽至高真空状态。

3) 烘烤预熔：

烘烤可加速镀件或夹具吸附的气体逸出，有利于提高真空度和膜层结合力。预熔可出去蒸发材料中低熔点杂质和蒸发源及蒸发材料中吸附的气体，有利于蒸发的顺利进行。

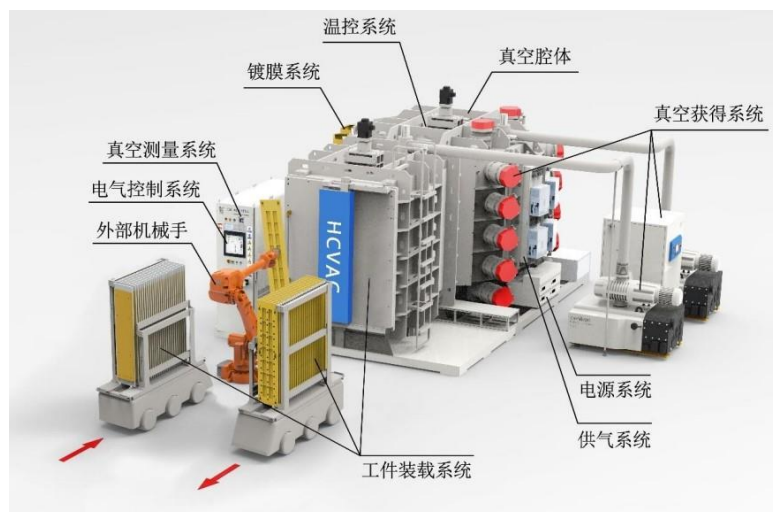
4) 蒸发与后续处理：

蒸发技术对镀层影响较大，对常见金属、特殊金属、化合物各有不同的要求。蒸发后需进行表面处理以及后续验证工作。

3.3 真空蒸发镀膜设备的商业化进程

蒸发镀膜设备由真空抽气系统、真空腔体及其他外围设备组成。真空抽气系统由高真空泵、低真空泵、排气管道和阀门等组成；真空腔体内配置有蒸发源、加热装置、放置基板等部件。

图13：蒸发镀膜设备示意图



资料来源：汇成真空招股说明书，民生证券研究院

蒸发镀膜设备在光学薄膜、光伏电池、集成电路、信息显示、建筑玻璃等众多领域有广泛应用。

表4：蒸镀设备相关应用领域

应用领域	具体应用
电子元器件	蒸发镀膜设备在电子管以及传感器领域的应用：电子管的光电导面、导电膜和电极，用于超算的约瑟夫器件的约瑟夫组合、绝缘膜和电极，计算机存储器中的磁泡传感器、磁盘传感器等均可采用蒸发工艺成膜。
光学元器件	蒸发镀膜通常用于镀膜光学元件和眼科镜片。蒸镀多层以改善镜片的性能。其中包括抗反射层、硬涂层、红外线或紫外线防护、防晒和镜面涂层。真空蒸镀在光通信、激光器件、光学传感、车载镜头、智能手机、安防监控等领域应用广泛。
平板显示	蒸镀法在平板显示领域的应用主要是液晶显示器（LCD）、等离子显示器（PDP）、有机发光二极管显示器（OLED）、触控（TP）显示等器件的各类功能薄膜的制备。
集成电路	真空蒸镀方法可实现在大规模集成电路快速金属薄膜沉积，常用于制备金属导线、金属化合物薄膜、籽晶层、阻挡层、硬掩模、焊盘等结构。
光伏发电	蒸镀法广泛应用于光伏电池的薄膜制备。钙钛矿层、HTL空穴传输层、电极层均能使用蒸镀法生产。
建筑玻璃	建筑玻璃领域，low-e玻璃、阳光控制膜、低辐射玻璃、防雾防露自清洁玻璃的功能薄膜均可使用蒸镀法生产。

资料来源：汇成真空官网，民生证券研究院整理

真空镀膜工艺起源于国外，基于先发优势与大量投入的研发资金，国际领先企业占据全球真空镀膜设备研制生产的市场领先地位。国际市场上，高端真空镀膜设

备市场主要被应用材料、爱发科、德国莱宝等资金实力雄厚、技术水平领先、产业经验丰富的跨国公司所占领。

近年来，随着我国真空镀膜设备制造业的发展，镀膜设备制造行业上下游相关行业不断发展壮大，更多技术先进的本土企业进入真空镀膜行业。国内外部分蒸镀设备企业如下表：

表5：国内外部分真空镀膜设备厂商

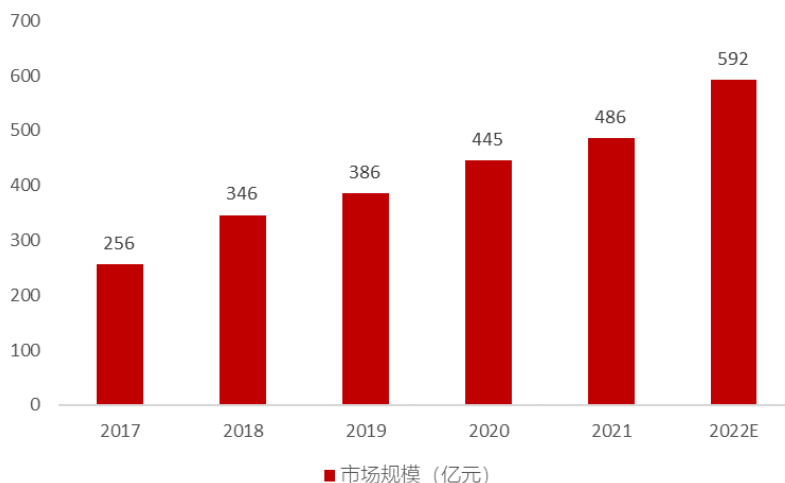
公司名称	设备类型	应用场景	相关业务
应用材料	真空镀膜设备	半导体、显示器	主要向半导体、显示器及相关行业提供制造设备、服务和软件，在半导体领域的主要产品为芯片制造领域的各种制造设备。
日本光驰株式会社	真空镀膜设备	半导体、显示器、光通信	主要从事光学薄膜设备及其相关零部件的制造和销售，产品广泛应用于 LED 显示、光通信、半导体、消费电子等领域。
德国莱宝	真空镀膜设备	半导体、光伏、医疗器械	主要从事真空泵、真空系统、以及包括真空镀膜设备在内的真空应用设备的制造和销售，该公司产品目前主要为光学、光伏、半导体、医疗器械等。
冯·阿登纳	真空镀膜设备	光伏、显示屏	主要产品为玻璃、晶片、金属带和聚合物薄膜等材料上的真空镀膜开发和生产工业设备，应用于太阳能热电站建筑玻璃，智能手机和触摸屏的显示屏等领域。
爱发科	真空镀膜设备	半导体、显示器、光伏	主要从事真空机械业务、真空应用等业务等立品主要应用在能源、环保、运输、医药、食品、化工、生物工程等领域。
晟成光电	团簇型多腔式蒸镀设备	光伏	晟成光伏的团簇型多腔式蒸镀设备，具备完全自主知识产权，设备整体配置上料腔、传输腔及工艺腔，传输腔内配置有自主开发的真空机械手臂，用于实现各腔室间的基材传输，工艺腔可蒸镀多样性的钙钛矿材料。目前 PVD 镀膜设备占钙钛矿整线的价值比例大概在 50%左右。目前主要开发的设备还有真空干燥设备和前段的清洗设备。
捷佳伟创	立式反应式等离子体镀膜设备	光伏	捷佳伟创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。
欣奕华	Inline 钙钛矿真空镀膜机	光伏	合肥欣奕华研发钙钛矿太阳能电池生产的关键量产设备 Inline 钙钛矿真空镀膜机已交付国内钙钛矿产业知名公司投入生产。
奥来德	线蒸镀源设备 钙钛矿蒸镀设备	光伏、显示器	OLED 有机材料与应用部件龙头奥来德公告使用超募资金投资建设钙钛矿结构型太阳能电池蒸镀设备的开发项目，投资额 2900 万元。
泰科诺	真空镀膜设备	光通信、光伏	主要研发设计生产蒸发镀膜机、磁控溅射镀膜机、多功能复合镀膜机、粉体镀膜设备、高真空应用炉等设备。

四盛科技	真空镀膜设备	半导体、光学器件	四盛科技有限公司是一家国内集真空设备研发、销售、生产和服务于一体的较大型专业化公司。公司在行业内具有多年真空专用设备的技术和生产经验，特别是光学镀膜机、卷绕镀膜机、磁控溅射镀膜机等产品深受国内外用户的好评。
汇成真空	真空镀膜设备	半导体、光伏	研发、生产和销售各类光学镀膜设备、功能性薄膜涂层设备、装饰涂层设备、卷绕镀膜设备、汽车零部件镀膜设备、连续式磁控溅射镀膜生产线、超高真空系统等真空设备、半导体设备、电子生产设备、光电设备、光伏设备、动力电池设备及产品相关配件的国家高新技术企业。
宏大真空	真空镀膜设备	光伏、显示器、建筑玻璃	集研发、设计、生产、销售于一体的专业从事真空镀膜设备制造的企业，在国内高端真空镀膜设备领域的市场占有领先地位。

资料来源：各公司公告、年报、招股书，民生证券研究院整理

真空镀膜行业作为高端制造的基石，随着半导体、新能源、新材料、航空航天等产业的崛起，将迎来快速发展的机遇。根据中商产业研究数据统计，2021 年中国真空镀膜设备行业市场规模 486 亿元，同比增长 9.13%，预计 2022 年中国真空镀膜设备行业市场规模将达到 592 亿元。

图14：2017-2022 年中国真空镀膜设备市场规模预测趋势图

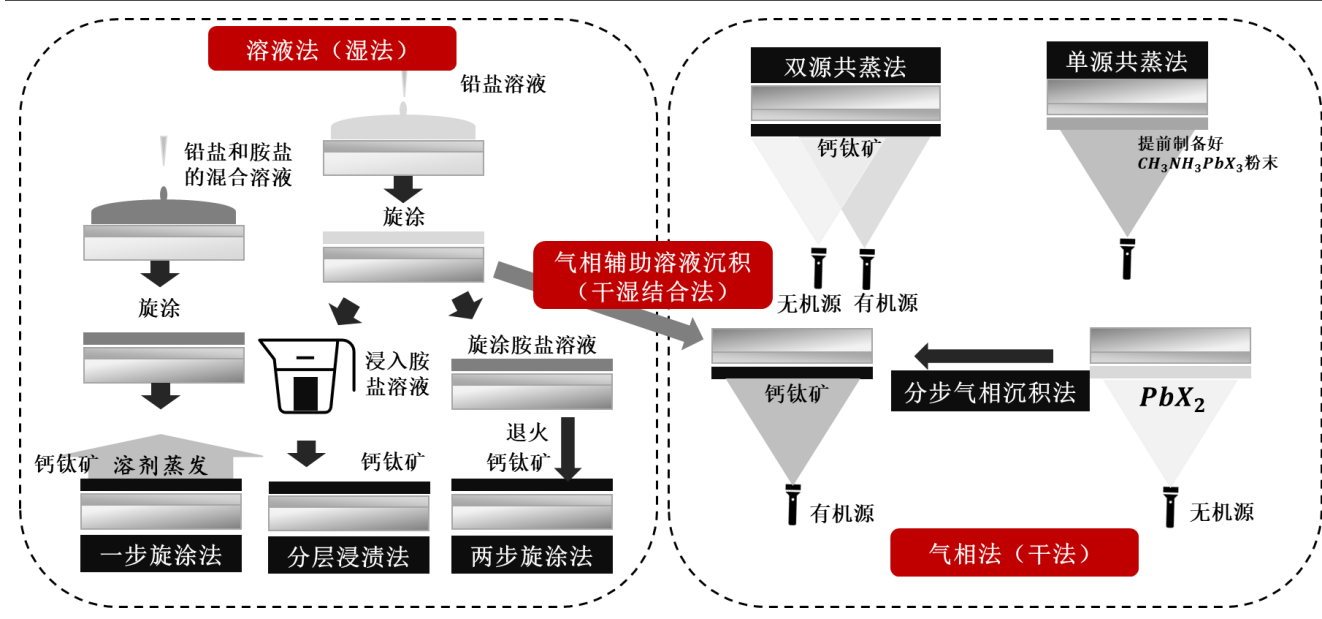


资料来源：中商产业研究院，民生证券研究院

4 钙钛矿层薄膜制备

4.1 钙钛矿层薄膜制备方法

图15：钙钛矿层薄膜制备方法概览



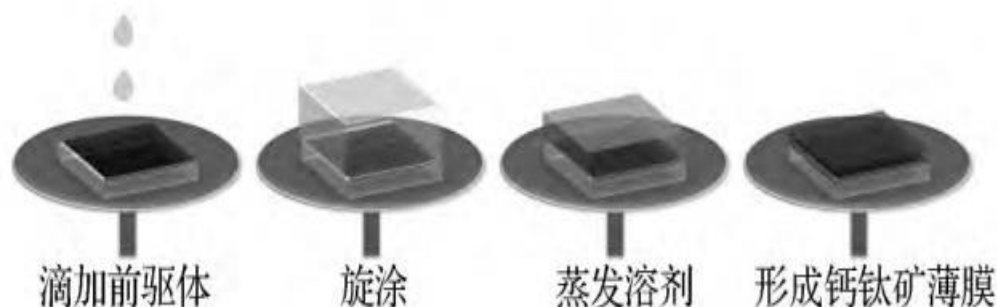
资料来源：《钙钛矿太阳能电池材料详解》视频资料，民生证券研究院

4.1.1 溶液法（湿法制备）

1) 一步溶液法

一步溶液法制备有机无机杂化钙钛矿薄膜的过程包括：将有机源和无机源按照一定的比例同时溶解在有机溶剂中配置成一种前驱体溶液，然后将配置好的前驱体溶液滴加在基体上进行旋涂，旋涂的过程中将甩去多余的溶剂，在基体上剩余一定厚度的前驱体液膜，然后通过自然干燥的方式即可得到所需的有机无机杂化钙钛矿薄膜。这种方法由于操作简单、对设备要求低，被认为是一种具有商业化潜力制备薄膜的有效途径。然而研究发现，传统“一步溶液旋涂法”制备的钙钛矿膜往往出现对基底覆盖度低、膜层粗糙且孔洞多，严重影响了钙钛矿太阳能电池的光电性能。

图16：一步溶液法制备有机无机杂化钙钛矿薄膜的过程图



资料来源：《一步溶液法制备全覆盖有机无机杂化钙钛矿薄膜研究进展》，民生证券研究院

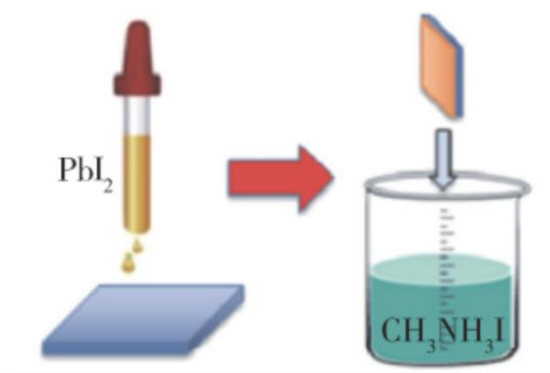
2) 两步溶液法

在钙钛矿的成膜工艺中，两步法由于具有较好的可控性，可重复性高，制备全覆盖的膜层较为容易。两步溶液法制备钙钛矿薄膜包括两个过程：第一步先制备出无机铅盐初始膜，然后与有机相接触，利用离子扩散渗透再键合的过程来制备出钙钛矿薄膜。目前有分部浸渍法和两步旋涂法两种技术。

分部浸渍法，这个方法由 Gratzel 提出，首先在多孔 TiO_2 (厚度约 400nm) 上旋涂 PbI_2 使其均匀进入多孔层，形成 20nm 左右大小的微晶，再将干燥后的薄膜浸没于 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 溶液中，经历约 1 分钟的反应，便可使 PbI_2 完全反应形成钙钛矿。多余的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 溶液可以用异丙醇冲洗掉。分部液浸法可以很好地控制薄膜的形貌和均一度，进而将介孔结构钙钛矿太阳能电池的效率提升至 15% 以上。

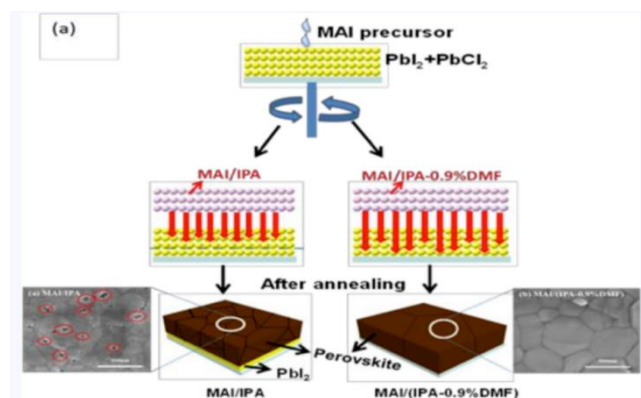
两步旋涂法，黄劲松课题组基于分部浸渍法的基础上开发出的一种较为精准定量的方法。这种方法也是先旋涂 PbI_2 ，之后再旋涂适量的 MAI/IPA 于其上部，再经退火而实现两层间的相互扩散和反应。相对于分部浸泡法，两步旋涂工艺更为简单，更易操作，并且可以避免 IPA 溶液长时间的浸泡，从而减小 IPA 对钙钛矿膜的破坏。

图17：分部浸渍法示意图



资料来源：《一文了解钙钛矿太阳能电池》，民生证券研究院

图18：两步旋涂法示意图



资料来源：《太阳能电池之钙钛矿太阳能电池》，民生证券研究院

4.1.2 气相法（干法制备）

1) 双源共蒸法

双源共蒸法相当于溶液制备方法中的一步法，但是两种材料以气相存在并均匀混合反应。2013 年，Snaith 团队第一次报道了铅卤钙钛矿薄膜的真空气相沉积。作者采用两组蒸发源，其中一组用以蒸发 PbCl_2 ，另外一组用于蒸发 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 。两种材料共同沉积于衬底上形成钙钛矿薄膜。在本次实验中，作者发现作为对照的溶液法制备的钙钛矿薄膜呈非晶态，部分位置薄膜厚度非常小，而真空气相法沉积的薄膜结晶性相对较好，结构致密，厚度均匀。此后不久，瓦伦西亚大学的 Bolink 和瑞士联邦理工学院 Nazeeruddin 团队采用 PbI_2 和 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 共蒸沉积进行研究，显示真空气相镀膜法进行大面积钙钛矿薄膜的制备的潜力。

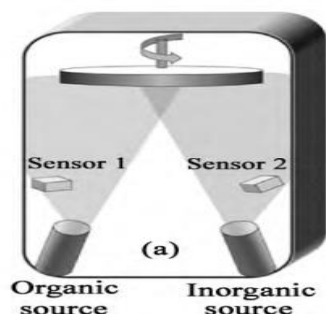
2) 单源蒸发法

单源共蒸法研究采用 PbX_2 和 MAX 作为两个分立源同时蒸发的方法实现真空沉积。小部分研究人员尝试采用单源法进行真空沉积。由于 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ 中的热稳定性差，在 $150 \sim 200^\circ\text{C}$ 即开始分解，而钙钛矿材料的蒸发温度高于这一温度，普通的蒸发方法会导致材料先分解成 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{X}$ 和 PbX_2 。因此单源蒸发需要采用瞬蒸法，即将材料温度瞬间提高到蒸发温度，使材料蒸发出来沉积到衬底上。

3) 分步气相沉积法

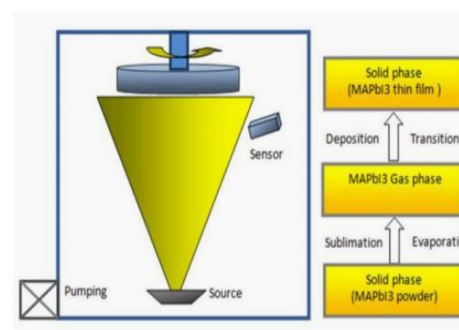
台湾国立清华大学林皓武教授团队采用真空蒸发腔体进行分步气相沉积。首先，真空蒸镀一层 PbCl_2 薄膜，然后在源温度为 85°C 下蒸发 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 。在约 10^{-4}Pa 的真空环境下，作者比较了不同衬底温度的薄膜的结晶质量和器件效率，发现当衬底温度为 75°C 时制备出的样品晶粒尺寸最大。

图19：双源共蒸法示意图



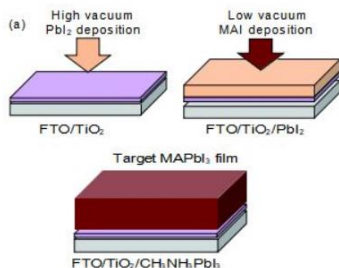
资料来源：《钙钛矿薄膜的气相法制备及光伏应用的研究进展》，民生证券研究院

图20：单源蒸发法示意图



资料来源：《单源热蒸发法制备 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜及钙钛矿太阳能电池研究进展》，民生证券研究院

图21：分步气相沉积法示意图

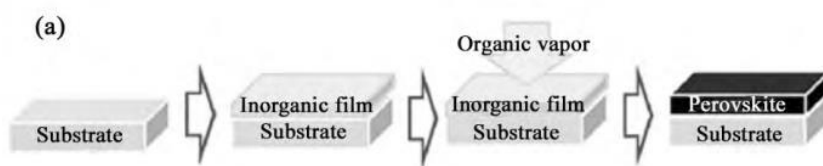


资料来源：《钙钛矿薄膜的气相制备及高效光伏转换》，民生证券研究院

4.1.3 气相辅助溶液法（干湿结合法）

在钙钛矿材料的早期的研究中，研究者将 PbI_2 的薄膜浸入到 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 的溶液中， $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 可以渗入到 PbI_2 的晶格中形成钙钛矿结构，这即是两步法基本原理。基于同样的过程，气相法也发展了两步法。2014 年，杨阳团队提出了气相辅助溶液法(VASP)。首先旋涂制备 PbI_2 薄膜，然后将薄膜暴露于 150°C 的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 蒸汽中进行退火。随着退火时间增加， $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 扩散进入 PbI_2 薄膜中并进行反应生成 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 。溶液两步法中存在溶质的再溶解，因此在长时间的反应中经常会引起钙钛矿薄膜的再溶解而破坏薄膜的致密性。采用气相法可以避免这一过程。研究发现，经过 2h 的气相反应， PbI_2 可以完全转化为 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ，并且退火时间继续增加对薄膜结构没有进一步的影响。

图22：气相辅助溶液法的制备有机无机杂化钙钛矿薄膜的过程图



资料来源：《钙钛矿薄膜的气相法制备及光伏应用的研究进展》，民生证券研究院

4.2 技术最新进度：专利布局、公开新闻

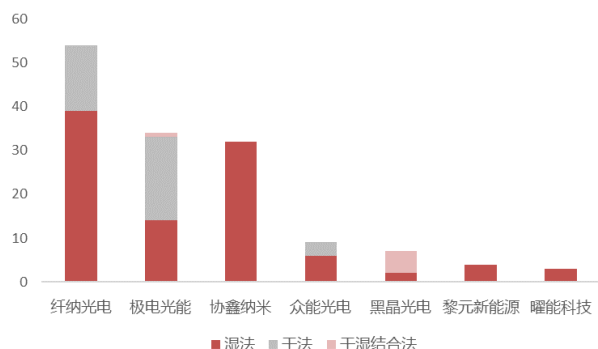
1) 总量：湿法相关专利最多且发展时间较长，2014 年就有相关专利；湿法专利数和发展时长次之，干湿结合法相关专利最少且最新，2021 年首次出现。

2) 趋势：2021/2022 年钙钛矿企业相关专利布局总数热度回升，其中湿法相较 2018-2020 年的平均水平差异不大，但干法相关专利数相较 2018-2020 年的平均水平有较大幅度上升，同时 2021 年开始首次出现了干湿法相结合专利布局。

3) 各家布局：协鑫纳米、黎元新能源、曜能科技湿法专利明显突出，纤纳光

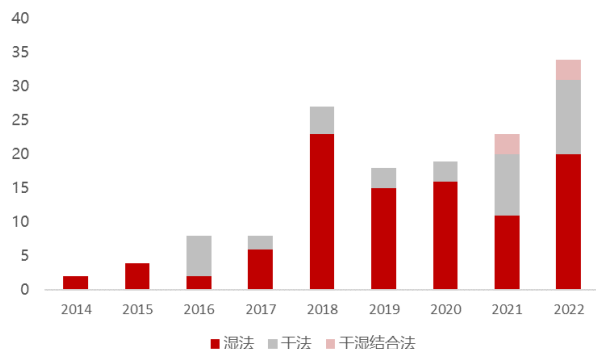
电、极电光能、众能光电则是选择湿法、干法专利同时布局。目前来看不同薄膜制备方法仍处于两种技术并存发展的状态。

图23：2014-2022 年钙钛矿电池厂商薄膜制备相关专利统计图（个）



资料来源：企知道专利数据库，民生证券研究院

图24：2014-2022 年薄膜制备工艺相关专利时间分布统计图（个）



资料来源：企知道专利数据库，民生证券研究院

表6：钙钛矿电池公司近期动态

公司	时间	相关新闻
光晶能源	2022 年 11 月 25 日	光晶能源研制出独家钙钛矿墨水配方。通过调制钙钛矿墨水配方，涂覆过程中并不会生成钙钛矿晶体。在生成结构紧密的膜后，于退火过程中再通过反应使其生成致密的钙钛矿晶体，因此可以避免干燥过程中钙钛矿晶体无序生长的痛点。同时，该墨水技术可以实现 连续狭缝涂布 ，大幅提升生产效率。
脉络能源	2022 年 11 月 19 日	团队通过原位生成核壳结构钝化表面缺陷态、特殊添加剂配方抑制晶体不可逆降解等方式以增强材料稳定性； 通过连续性狭缝涂布印刷 、预结晶控制等工艺和特殊的背电极材料等降低生产成本
纤纳光电	2022 年 5 月 20 日	纤纳光电钙钛矿 α 组件全球首发，该组件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，可进行 12 年产品材料与工艺质保，25 年线性功率输出质保。
协鑫光电	2021 年 12 月 7 日	第三届(2021)全球钙钛矿与叠层电池产业化论坛在江苏昆山圆满落幕。昆山协鑫光电有限公司总经理范斌博士在介绍协鑫全球首条 100MW 钙钛矿电池生产线建设进展时，展示并认可上海德沪涂膜设备有限公司向协鑫供应的全球首套钙钛矿电池制造核心涂膜设备系统，范博士指出：我们选择 狭缝涂布工艺 来制造钙钛矿层并不是因为湿法便宜，而是因为效果好。
万度光能	2021 年 6 月 8 日	由湖北万度光能有限责任公司总投资 60 亿元的 万度光能可印刷介观钙钛矿 太阳能电池生产基地项目正式签约落户葛店开发区。
无限光能	2022 年 12 月 27 日	公司联合创始人兼首席科学家、清华大学电机系易陈谊团队提出了一种可重复蒸发的熔盐策略，用于制备高效钙钛矿太阳能电池。该工艺显著提升了 真空气相沉积法 制备钙钛矿太阳能电池的重复性和可应用的钙钛矿材料范围。对于商业化量产来说，该方法尤为重要，它不仅极大的提高了生产良率，同时大大降低气象沉积工艺控制难度、提升了生产效率、降低了设备投资成本。
极电光能	2021 年 5 月 13 日	采用了“原位固膜”技术，也叫“ 干法搭骨架，湿法定结晶 ”。先用真空法制作一层针孔密集的“骨架层”，再用溶液涂布来涂覆钙钛矿的前驱液，让膜层的制备在可控条件下发生，实现高质量的钙钛矿薄膜面积连续放大。

资料来源：各公司公告、公众号，民生证券研究院

表7：钙钛矿电池设备供应商近期动态

公司	时间	相关新闻
众能光电	2022 年 12 月 21 日	众能光电已对外销售 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；
德沪涂膜	2022 年 12 月 10 日	德沪涂膜 狭缝涂布设备 已供货大面积钙钛矿产线达 350MW，市占率 70%
	2021 年 12 月 7 日	德沪涂膜深耕 狭缝涂布设备 ，供应协鑫 100MW 量产线
弗斯迈	2022 年 10 月 31 日	狭缝涂布设备是钙钛矿组件整线解决方案中必不可少的环节，弗斯迈研发团队将花更多的精力来研究 狭缝涂布设备 ，提高工艺的成熟度，为设备的产业化做努力。
	2022 年 10 月 25 日	钙钛矿电池制备流程的 涂布设备 、 PVD 设备 等，弗斯迈都在接力研发中。
合肥欣奕华	2022 年 11 月 7 日	合肥欣奕华研发的用于钙钛矿太阳能电池生产的关键量产设备 Inline 钙钛矿真空镀膜机 已交付国内钙钛矿产业知名公司投入生产。
晟成光伏	2022 年 8 月 10 日	华中科技大学微纳中心陈蓉教授团队与苏州晟成光伏设备有限公司在苏州签订技术战略合作协议。双方本着“长期合作，互利共赢，强有力联合发展”的原则，在光伏原子镀膜技术合作上建立长期深层次的全面战略合作伙伴关系，进行 光伏原子镀膜技术 开发，将新型镀膜技术应用至光伏市场，共同推进光伏核心装备制造国产化进程。
	2022 年 6 月	6 月，京山轻机(000821.SZ)子公司晟成光伏 团簇型多腔式蒸镀设备 应用于多个客户端。据介绍，晟成光伏称公司团簇型多腔式蒸镀设备，具备完全自主知识产权，是用于钙钛矿电池制备过程中钙钛矿材料及金属电极材料的蒸镀设备。
捷佳伟创	2022 年 10 月	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，捷佳伟创自主研发的 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。
	2022 年 7 月 10 日	7 月 10 日，捷佳伟创迎来首套量产型钙钛矿电池核心装备出货，该公司代表最新前沿技术钙钛矿太阳能电池生产的关键量产设备“ 立式反应式等离子体镀膜设备 ” (RPD)通过厂内验收，将发运给客户投入生产，客户为专业从事钙钛矿产业化技术开发的企业。

资料来源：各公司公告、公众号，民生证券研究院

钙钛矿电池设备供应厂商不断精进涂布和镀膜设备，部分公司如弗斯迈同时经营不同工艺有关设备，力图打造钙钛矿光伏电池组件整线解决方案，现已初见成效。钙钛矿电池公司也在致力于薄膜制备工艺的研发创新，更好发挥干法、湿法、干湿结合法各自的优势。

4.3 钙钛矿层制备的工艺难点

钙钛矿电池优异的光电性能得益于金属卤化物本身的优异物理特性，例如该类材料为直接带隙半导体，具有较高的光电吸收系数、载流子迁移率，较长的载流子扩散长度，带隙可调等。但是随着电池面积增大，钙钛矿电池相比其他光伏电池，能量转换效率下滑幅度更明显。大面积电池模组和小面积器件效率失配的主要原因有：

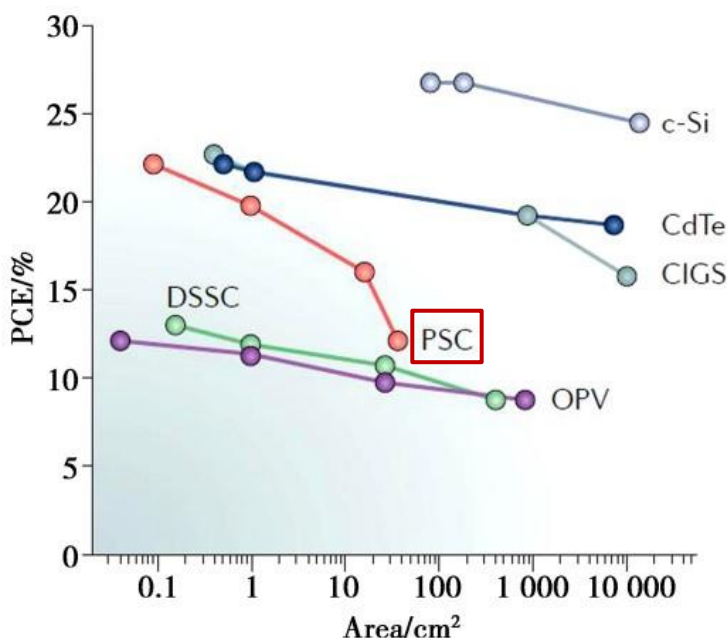
- (1) 大面积钙钛矿薄膜容易出现孔洞；
- (2) 器件面积增大时，串联电阻增大、并联电阻减小；

(3) 大面积界面层质量不易控制;

(4) 连接子电池单元的死区造成效率损失。

在钙钛矿电池各功能层的制备过程中, 难度最大也最为关键的是钙钛矿活性层的大面积制备, 其他功能层的大面积制备均可借鉴已经商业化应用的其他类型光伏薄膜电池电荷传输层制备方法。目前小面积 ($< 1\text{cm}^2$) 的钙钛矿电池主要通过溶液涂旋法制备, 而当器件面积扩展到 100 cm^2 以上时, 由于旋涂技术固有的边缘效应、扩展性差、原料浪费等缺陷导致该方法不再适用。如何在于保证大面积薄膜的致密性、覆盖性、平整度、大晶粒尺寸, 是当前钙钛矿薄膜工艺的重点研究方向。

图25: 不同类型太阳能电池的光电转换效率和器件面积关系 (PSC 为钙钛矿电池)



资料来源:《大面积钙钛矿薄膜制备技术的研究进展》, 民生证券研究院

4.4 涂布、蒸镀对比总结

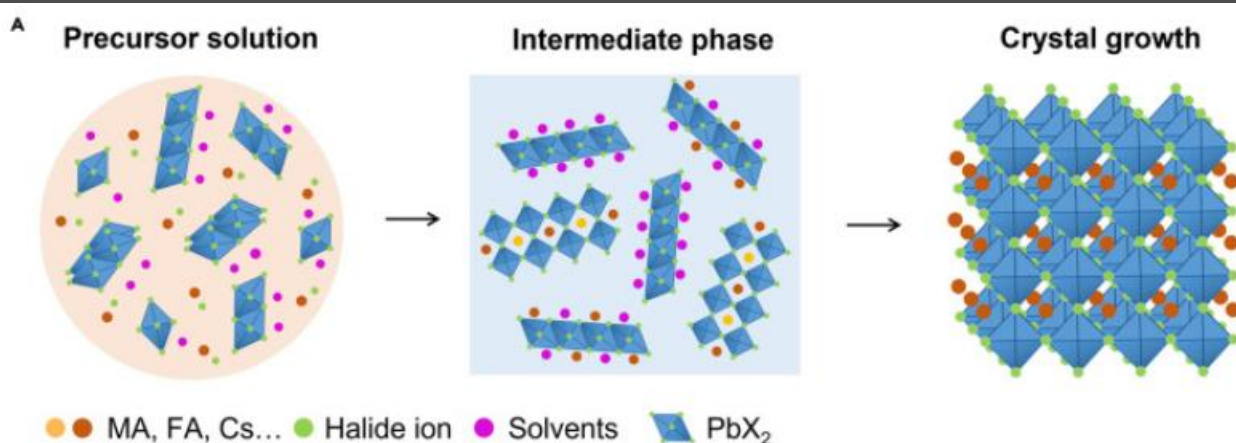
- 1) **价格:** 假设考虑相同产能, 由于涂布设备采用湿法镀膜速度更快, 因此会比使用蒸镀设备的干法更为便宜。
- 2) **产能:** 涂布更快; 蒸镀法蒸发有机材料速度较慢, 蒸发无机材料较快。
- 3) **涂布的步骤:**

溶液涂布法制备杂化钙钛矿膜时, 一步法是将 PbI_2 和有机胺盐溶解于一定溶剂中, 形成钙钛矿前驱体溶液, 再涂布到传输层上形成钙钛矿多晶薄膜, 并且在涂布过程中以滴加反溶剂或吹气的方法加速钙钛矿结晶。一步法工艺

简单且操作方便，但缺点是钙钛矿形貌对反溶剂滴加时机和吹气条件敏感，制备的钙钛矿薄膜形貌变化较大，性能难以控制，重复性差，晶粒尺寸小，覆盖率低。两步法是先在传输层上涂布制备 PbI_2 薄膜，在此基础上通过浸润法或涂布法制备沉积胺盐（浸入有机胺盐溶液反应或者涂布有机胺盐溶液，实现有机胺盐的插入），胺盐与 PbI_2 反应生产钙钛矿晶体。两步法相较于一步法制备的薄膜在表面形貌、平整度方面均有提升，具有良好的重复性。但是，由于两种方法都涉及由二维 PbI_2 到三维钙钛矿结构的转变，转变过程中很容易形成表面形貌缺陷和晶体结构缺陷，内部缺陷的产生会导致空穴传输层和电子传输层直接接触，形成载流子复合中心，造成短路电流密度和填充因子（FF）的降低，不利于器件性能提升。

溶液涂在基底后，再转移到真空气盒中进行干燥来控制结晶，最后再退火。干燥结晶过程中，溶液形成晶核，再结晶变为晶体，晶核含量高的区域结晶比例更高，导致局域能量转换效率更高。如果不同区域之间结晶均匀性较差，会影响转换效率。**控制结晶的一致性对钙钛矿层质量至关重要，通常会使用到真空气盒 VCD 设备**，方法是放入 VCD 内用真空泵快速抽真空，这样可以形成一个中间相的薄膜结晶，然后热退火形成高质量的钙钛矿薄膜，如果这一步控制的不到位，晶体生长的质量会出问题，会影响钙钛矿层的质量，后续再考虑提升光电的转换效率就非常困难。涂布最大的问题是难以结晶的质量。

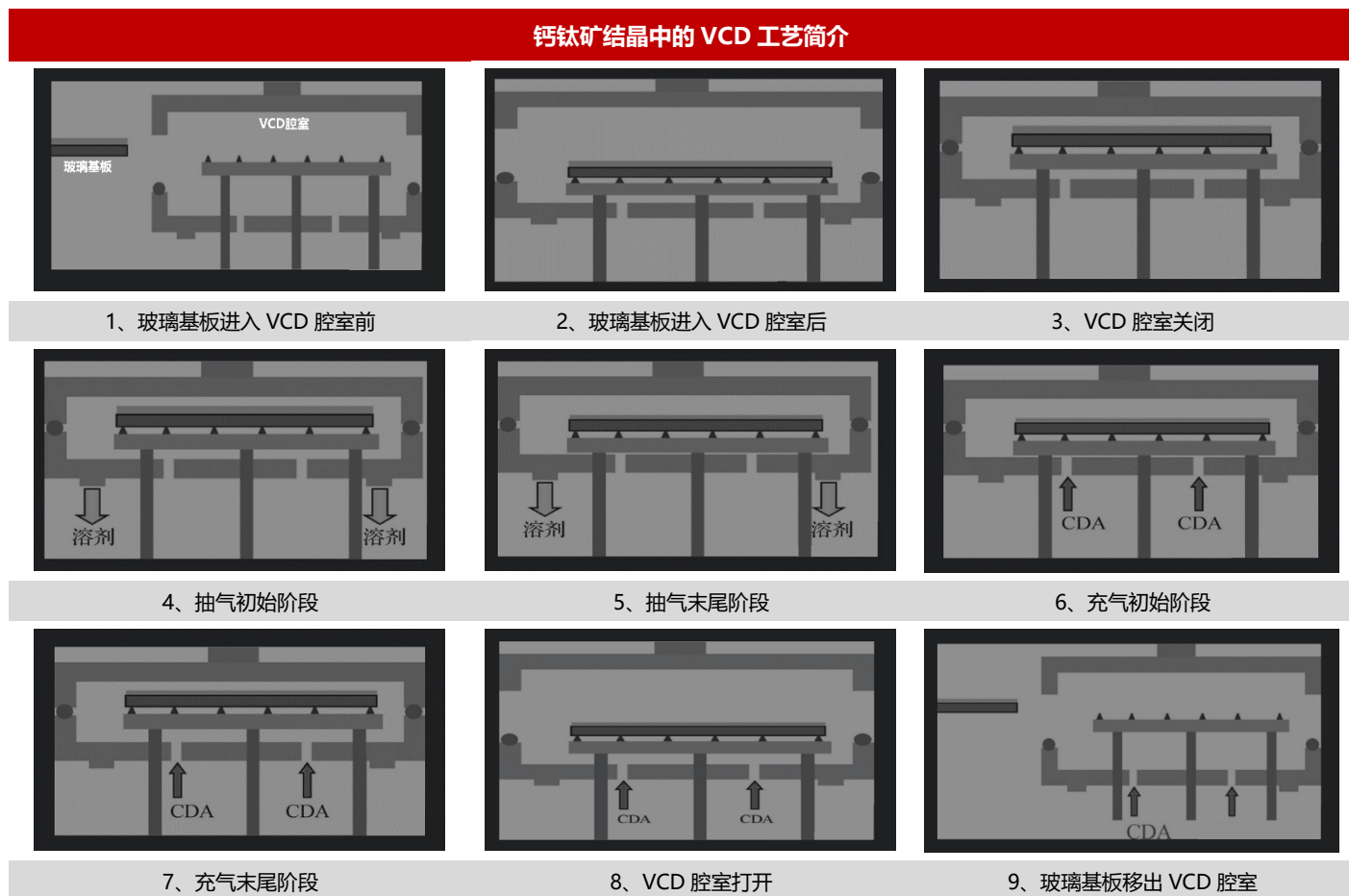
图26：溶液法中钙钛矿晶体生长示意图（左：钙钛矿前驱体溶液；中：钙钛矿前驱体与溶剂/添加剂配位形成的中间相；右：退火后形成钙钛矿晶体）



资料来源：《Intermediate phase engineering of halide perovskites for photovoltaics》，民生证券研究院

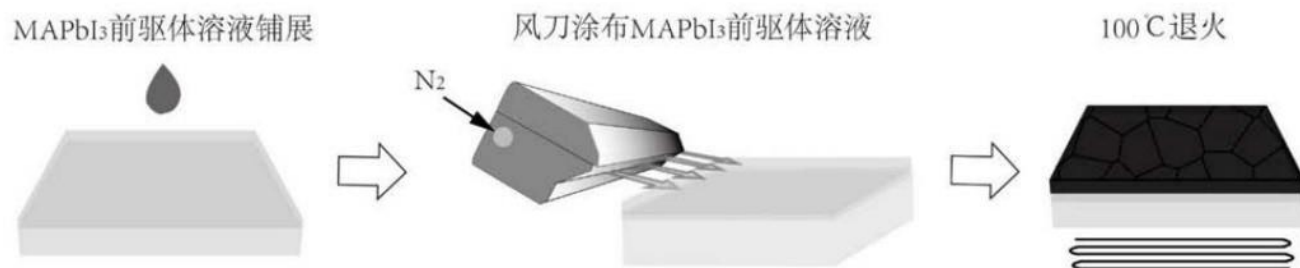
涂布法的结晶控制方面，协鑫使用真空气盒 VCD（减压干燥工艺，原理是通过真空泵将腔体抽成真空，使材料中的溶剂在常温或低温下挥发，再用干净干燥空气（CDA）把腔体中的压力恢复到标准大气压）来控制。光晶能源采用的是风刀吹气。风刀是涂布机的一个配件，利用压缩气体进入风刀后形成的高强度气流薄膜，均匀涂布钙钛矿前驱体溶液，同时快速带走溶液中的溶剂成分，促进均匀地爆破成核及生长，从而制备钙钛矿薄膜。使用风刀涂布能节省一个设备，不过在大面积下更难控制。

表8：钙钛矿结晶中的 VCD 工艺简介



资料来源：德沪涂膜设备公众号，民生证券研究院

图27：风刀涂布示意图



资料来源：《一种应用风刀涂布制备钙钛矿太阳能电池的方法》，中国科学院化学研究所，民生证券研究院

4) 蒸镀的步骤：

蒸镀需要先抽真空，同时还需要破真空，即晶体薄膜必须拿出来在外界空气中进行退火（一般也是高温加热，和湿法很像，唯一的区别在于湿度，一般蒸镀后的退火都需要湿度环境，湿法的退火可能不需要），抽真空和破真空都需要时间。随着技术发展，可能会发现直接在真空腔体中退火的办法，但是也不能直接接着镀 ETL 层，因为中间还要做钝化层，而钝化层通常都是用狭缝涂布法，所以破真空这步还是很难绕开。

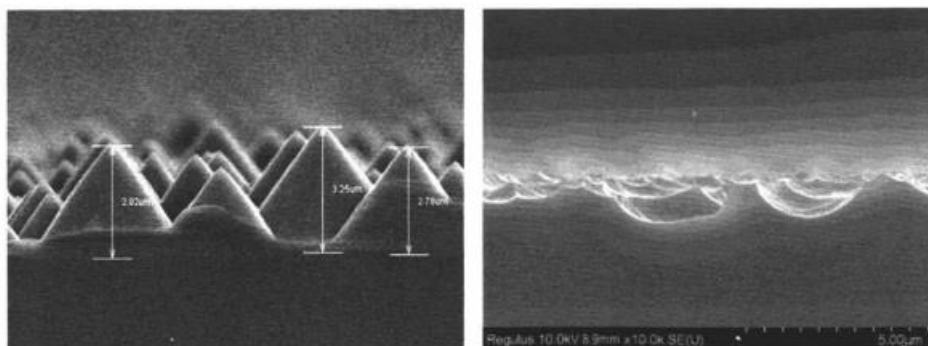
蒸镀法不需要结晶控制过程，这与涂布有本质区别，因为蒸镀法无论是共蒸，还是先蒸无机再蒸有机，都是有机层后被蒸上去，随后有机层和无机层就会反应，基本不存在中间相的问题，这时是需要控制反应完全且不能过量。不过，蒸镀法虽然不需要结晶控制，但是制备的薄膜依然可能有缺陷，因为像无机层的碘化铅，包括有机层的胺盐，蒸发过程中还是可能有一定的分解。钙钛矿本身是一个化合物，所以干法也需要后处理，破空、退火、加钝化层这些步骤。

蒸镀法制备的钙钛矿薄膜具有无孔、致密、均匀性好、缺陷少等特点。但是蒸发镀膜时，靶材蒸发气化后由于气体自身的扩散性质，部分靶材气体会沉积到容器内壁而非基板上，造成靶材损失和内壁污染。此外，现阶段钙钛矿层配方处于快速迭代时期，配方更改后，一方面需要重新评估新配方是否适合使用蒸镀法（沸点、热稳定性），另一方面需要精细调节蒸发源的各类参数以控制蒸发速率、化学计量比等。相比之下，涂布法由于事先制备溶剂，更多关注新配方的腐蚀性（调整零部件材料）、含固量（影响结晶和成膜速率）、粘性（影响涂布过程）等。

5) 开始考虑布局干法的原因：

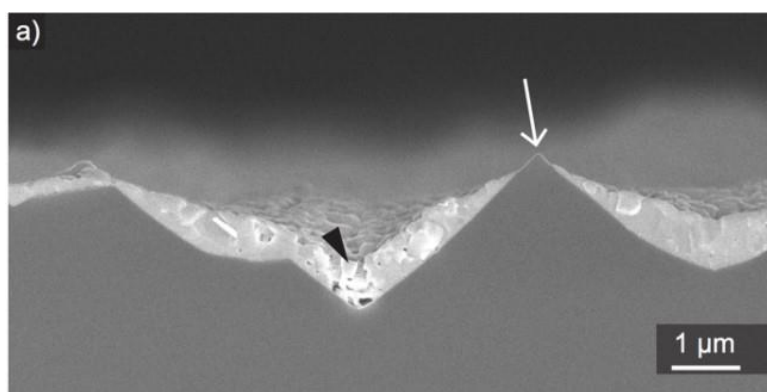
产业界开始考虑尝试蒸镀法的另一个原因，是干法对基底兼容性高，可以做绒面，这一点适合直接在晶硅表面制作的 2T 结构钙钛矿/晶硅叠层。目前产业化的晶硅电池为了提高光能利用率，电池表面通常会使用减反射技术，主要有两种：一种是在硅片表面制备一层具有陷光作用的绒面结构，另一种是在硅片表面制备减反射膜。制作钙钛矿+晶硅叠层电池时，湿法必须需要基底的表面平整，同时还需要对浸润性有要求。而如果做叠层电池时，晶硅的表面有绒不平整，浸润性也可能不同，这时干法的优势就凸显出来了。对于平整的表面，干法和湿法都能做，目前湿法发展的更快；对于基底不平整的时候，则只能采用干法（对应叠层电池的讨论详见后文）。

图28：两种典型太阳能电池晶硅绒面（左图：单晶硅；右图：多晶硅）



资料来源：《面向产业级太阳能电池的新型晶硅绒面仿真研究》，民生证券研究院

图29：绒面硅片上直接使用溶液法处理时成膜的不均匀现象



资料来源：《Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency》，民生证券研究院

综合而言，涂布法具有操作简单、方便调控、成膜速度快、原料利用率高、成本低、设备兼容度较高的特点，但存在成膜质量较差，存在较多的薄膜缺陷，导致载流子难以分离和扩散的问题，限制了能量转换效率的提升。蒸镀法制备的薄膜在均匀性、致密性、缺陷程度等方面表现更佳，在大面积成膜方向上更具有潜力，但是存在薄膜沉积速率慢，生产效率低，靶材利用率低，设备价格较高，设备兼容性较差等缺点，高真空和高温环境也会造成更多的能耗。蒸镀法对表面平整状况的兼容度更强，因此在晶硅叠层电池上，蒸镀法的潜力更大。

表9：涂布与蒸镀技术对比

技术路径	膜层质量	成本	兼容性（原料/基底）	生产效率
溶液涂布法	需要控制结晶的步骤，均匀性和厚度控制需进一步改进。	设备成本较低，原料利用率高。	配方更换需重新配制涂料溶液，对设备本身影响不大。但只适合平整的基底	较快
真空蒸镀法	在均匀性、致密性、缺陷程度等方面表现更佳。	设备成本较高，靶材利用率低（会附着在腔体上）	配方更换后需更换靶材，靶材蒸发速率等重要参数需要重新调整，工艺较复杂。但可以适应不平整的绒面基底	较慢

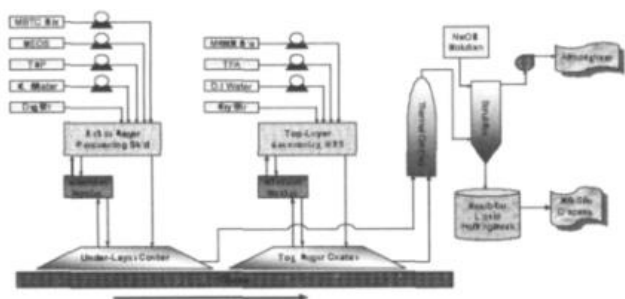
资料来源：《大面积钙钛矿薄膜涂布技术与钙钛矿太阳能模组研究》，《大面积钙钛矿薄膜涂布技术与钙钛矿太阳能模组研究》、《Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency》，民生证券研究院

4.5 钙钛矿整线其他层设备选择

以最常用的反式电池结构（TCO-HTL-钙钛矿活性层-ETL-电极）为例：

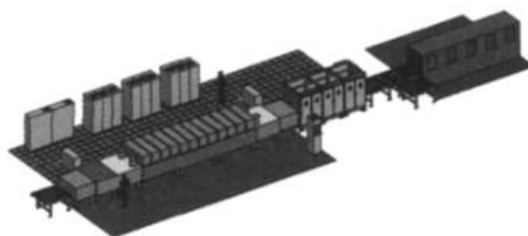
透明导电氧化物（TCO）层：TCO 导电玻璃包括 ITO、FTO、AZO 镀膜玻璃，分别使用锡掺杂氧化铟(In_2O_3)、氟掺杂氧化锡 (SnO_2) 和铝掺杂氧化锌 (ZnO) 作为靶材。TCO 制备大概可分为在线和离线镀膜两种方式。在线镀膜就是在浮法玻璃生产线锡槽的上方，安装镀膜设备，一般采用 **APCVD（常压化学气相沉积）** 工艺镀膜。离线镀膜是将超白浮法玻璃经过清洗、预加热，通过 **PVD（物理气相沉积，通常为磁控溅射技术）镀膜**，然后冷却、刻蚀，完成镀膜。FTO 在线镀膜技术比较成熟，设备价格较贵；ITO 和 AZO 通常离线镀膜，磁控溅射技术十分成熟。

图30：在线镀膜工艺示意图



资料来源：《TCO 玻璃的应用及制备方法》，民生证券研究院

图31：离线镀膜生产线简图



资料来源：《TCO 玻璃的应用及制备方法》，民生证券研究院

空穴传输层（HTL）：目前，应用于钙钛矿太阳能电池的空穴传输材料可分为4类，分别为无机空穴传输材料、有机金属空穴传输材料、共轭聚合物空穴传输材料和有机小分子空穴传输材料。

与有机空穴传输材料相比，**无机空穴传输材料**具有高稳定性、高迁移率和低成本等优点，但无机空穴传输材料的溶剂会溶解钙钛矿吸光层且成膜性较差。常见的无机空穴传输材料主要有 CuI、CuSCN 和 NiO_x 等。半导体 NiO_x 材料价格便宜、光电性能优越且热化学稳定性好，其制备的反式钙钛矿太阳能电池具有良好的市场应用前景。制备 NiO_x 方法较多，其中，**磁控溅射法 PVD** 成膜均匀，膜厚可控且重复性好；**原子层沉积法 ALD** 膜厚控制精确，薄膜极其光滑均匀，重复性高。除此以外，前人也采用溶液法制备 NiO_x 纳米颗粒分散液，并采用旋涂工艺制备 NiO_x 空穴传输层薄膜，但其制备过程通常需要高温退火，其薄膜质量对合成条件（例如环境温度、溶液 pH 值和搅拌时间）较为敏感，导致其重现性较差。更重要的是，采用现有的大面积薄膜制备技术（例如狭缝涂布法、喷涂法和喷墨打印法），基于溶液法制备纳米级厚度的薄膜，容易出现大量由气泡、难溶颗粒或表面不浸润区等引起的针孔等微孔洞型物理缺陷，无法在大面积范围内实现均匀的覆盖。而基于微孔洞的功能层制备的器件很难构建均匀的内建电场，容易导致钙钛矿器件从小面积向分米级或平米级器件拓展时出现明显的效率损失。

有机金属空穴传输材料，具有较高的载流子迁移率、高稳定性等优点。作为空穴传输材料，目前研究较多的是酞菁的衍生物，如酞菁铜（CuPc）、酞菁锌（ZnPc）等。相对于 Spiro-OMeTAD，CuPc 具有更高的器件稳定性和更低的成本，可采用结晶性好、成膜均匀的**真空蒸镀法**进行制备。

共轭聚合物空穴传输材料具有优异的成膜性、较高的空穴迁移率等优点，但是其纯化过程复杂、分子量分布不易控制，导致其重复性较差、材料价格昂贵等缺点。目前，应用最多的共轭聚合物空穴传输材料是聚[双(4-苯基)(2,4,6-三甲基苯基)胺]（PTAA）、PEDOT:PSS 和聚(3-己基噻吩-2,5-二基)（P3HT）等。

与聚合物材料相比，**有机小分子空穴传输材料**具有清晰的分子结构、精确的分子量、调节能级、以及结构多样性等特点，受到广泛关注，是目前研究最多的空穴传输材料。提到有机小分子空穴传输材料，其中最著名的是 spiro-OMeTAD。Spiro-OMeTAD 具有良好的溶解度和成膜性、较为匹配的能级等优点，是目前应用最为广泛的空穴传输材料。目前有机空穴传输材料如 PTAA、Spiro-OMeTAD 等可采用**涂布法**制备。

钙钛矿层：一般就是湿法（涂布机），在某些也有采用干法的方案（真空蒸镀），（前文已对比分析过涂布/蒸镀的适合场景）。

电子传输层(ETL)：TiO₂、ZnO、SnO₂ 等金属氧化物是常用的**无机电子传输材料**，其具有带隙可调、透光率高、载流子输运能力强等优点。对于 TiO₂、ZnO、SnO₂ 这类无机氧化物，采用**真空蒸镀或磁控溅射 PVD** 制备的薄膜制备，但是由于反式结构电池，电子传输层直接制备于钙钛矿活性层上方，电子传输层厚度一般为几十纳米，工业通常使用膜层损害程度较低的 RPD，而不使用磁控溅射法，以此尽量保证钙钛矿层不受伤害。

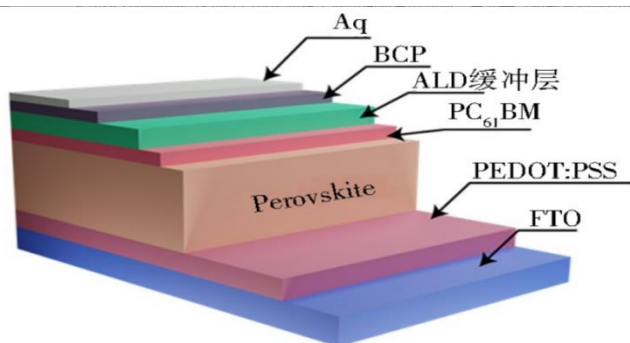
富勒烯及其衍生物(PCBM)、C60、C70 和基于 NDI 的小分子等**有机电子传输**

材料也可用于钙钛矿太阳能电池电子传输层。C60 和 C70 等原始富勒烯与 PCBM 相比，具有更高的电子迁移率和更低的成本优势，但在溶液制备过程中它们的溶解性差且易于结晶，因此采用溶液法沉积制备不佳，可以选择**真空蒸镀方法**。

电极层：材料包括金属（Au 等）和非金属（碳等），可根据器件类型及实验需要进行选择。**金属电极**一般采用**真空蒸镀**的方式进行沉积且厚度约为 80nm。电极材料在单电池器件中多选用导电性好的贵金属，如 Au，为控制成本，也会使用金属 Cu 或 Al 替代。

钙钛矿活性层中的碘化物和甲基铵离子会通过扩散穿过电子传输层并积聚在电极的内表面，从而使电池性能衰退。因此，在钙钛矿活性层与金属电极之间引入既可有效防止离子扩散，又不影响载流子传输的**缓冲层**，由于**原子层沉积 (ALD)** 技术具有自限制反应和逐层生长等特点，与热蒸镀、溅射和化学气相沉积等方法相比，所沉积的薄膜具有更好的致密性、均匀性和保形性，非常适合于上述缓冲层的制备。

图32：PSC 缓冲层结构示意图



资料来源：《SnO₂ 和 TiO₂ 薄膜在钙钛矿材料上的原子层沉积工艺》，民生证券研究院

图33：整线生产涉及工艺



资料来源：《钙钛矿太阳能电池及其空穴传输研究综述》、《钙钛矿太阳能电池中 NiO_x 空穴传输层的研究进展》、《钙钛矿太阳能电池大面积组件制备的研究进展》、《杂化钙钛矿太阳能电池中缺陷与界面钝化层的研究进展》、《钙钛矿太阳能电池大面积组件制备的研究进展》、民生证券研究院

5 钙钛矿应用：钙钛矿/晶硅叠层电池

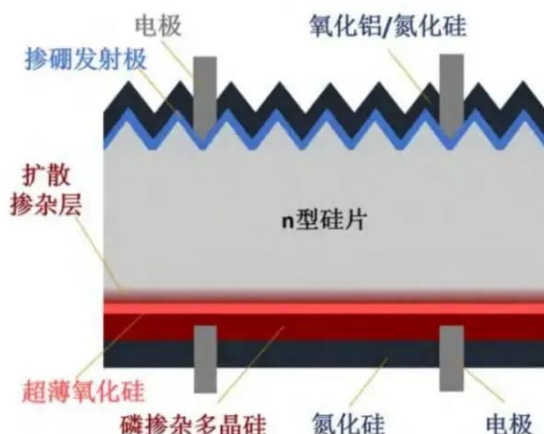
5.1 晶硅叠层钙钛矿电池以及研发背景

5.1.1 当前晶硅电池

晶硅电池技术是以硅片为衬底,根据硅片的差异区分为 P 型电池和 N 型电池。两种电池发电原理无本质差异,都是依据 PN 结进行光生载流子分离。在 P 型半导体材料上扩散磷元素,形成 n+/p 型结构的太阳能电池即为 P 型电池片;在 N 型半导体材料上注入硼元素,形成 p+/n 型结构的太阳能电池即为 N 型电池片。P 型电池制作工艺相对简单,成本较低,目前 PERC 占据主流。

N 型电池主要有 Topcon, HJT。Topcon(Tunnel Oxide Passivated Contact)——氧化层钝化接触,电池核心技术是背面钝化接触。电池背面由一层超薄氧化硅(1~2nm)与一层磷掺杂的微晶非晶混合 Si 薄膜组成,二者共同形成钝化接触结构。钝化性能通过退火过程进行激活, Si 薄膜在该退火过程中结晶性发生变化,由微晶非晶混合相转变为多晶。

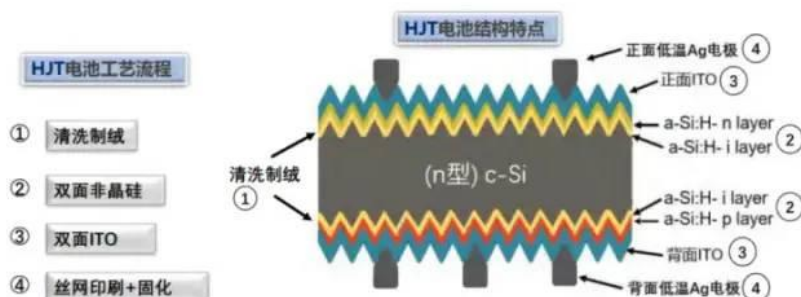
图34：Topcon 电池结构示意图



资料来源：电力电子研究院《一文读懂当前晶硅电池（PERC、Topcon、HJT、N-IBC、P-IBC）技术及工艺流程》，民生证券研究院

HJT (Heterojunction with Intrinsic Thin-film) ——本征薄膜异质结电池。具备对称双面电池结构,中间为 N 型晶体硅。正面依次沉积本征非晶硅薄膜和 P 型非晶硅薄膜,从而形成 P-N 结。背面则依次沉积本征非晶硅薄膜和 N 型非晶硅薄膜,以形成背表面场。鉴于非晶硅的导电性比较差,因此在电池两侧沉积透明导电薄膜(TCO)进行导电,最后采用丝网印刷技术形成双面电极。主要得益于 N 型硅衬底以及非晶硅对基底表面缺陷的双重钝化作用。

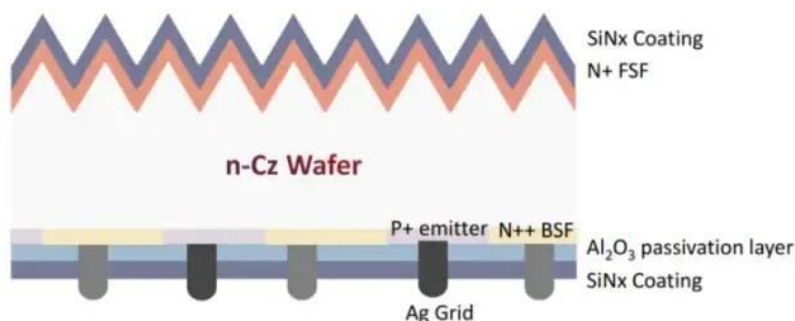
图35: HJT 电池结构示意图



资料来源：电力电子研究院《一文读懂当前晶硅电池（PERC、Topcon、HJT、N-IBC、P-IBC）技术及工艺流程》，民生证券研究院

此外，还有 IBC 电池（Interdigitated Back Contact）——交叉指式背接触电池技术，将 P/N 结、基底与发射区的接触电极以交指形状做在电池背面，分为 N 型 IBC 以及 P 型 IBC。目前 IBC 电池制程工艺复杂，成本较高尚未产业化。

图36: IBC 电池结构示意图

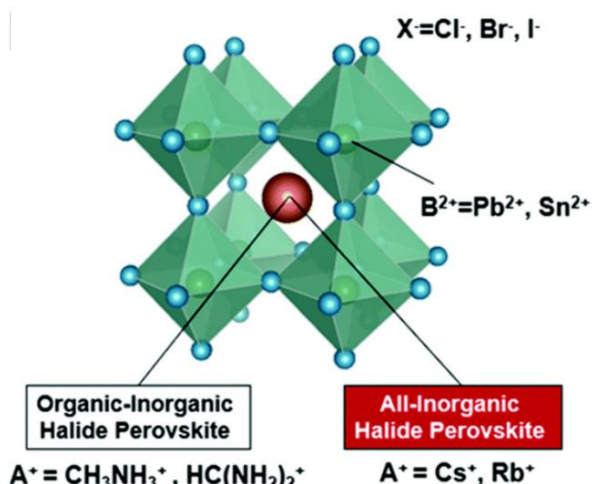


资料来源：电力电子研究院《一文读懂当前晶硅电池（PERC、Topcon、HJT、N-IBC、P-IBC）技术及工艺流程》，民生证券研究院

5.1.2 钙钛矿晶硅叠层电池

钙钛矿是指一类陶瓷氧化物柔性材料，呈立方体晶形。狭义的钙钛矿特指 CaTiO_3 ，广义的钙钛矿泛指与 CaTiO_3 结构类似的 ABX_3 型化合物，A 代表有机分子（一般为 CH_3NH_3 等），B 代表金属离子（一般为铅或锡），X 代表卤素离子（一般为氟、氯、溴、碘、砷）。利用钙钛矿型的有机金属卤化物半导体作为吸光材料的太阳能电池，则被称为钙钛矿型太阳能电池，钙钛矿电池属于一种非硅（薄膜）电池，目前用于太阳能电池发电层的钙钛矿材料一般为有机-无机杂化钙钛矿材料。

图37：钙钛矿正八面体晶体结构图

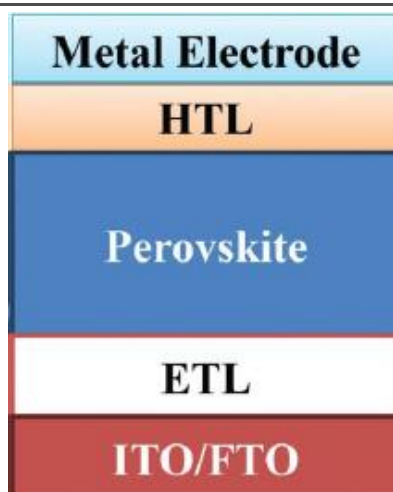


资料来源：澎湃《能创无限 | ABX₃钙钛矿？没钙无钛不是矿！》，民生证券研究院

纯钙钛矿电池结构

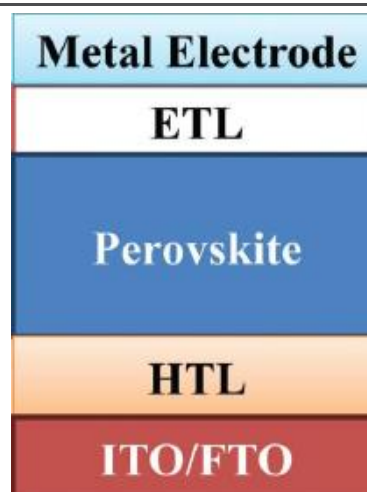
目前钙钛矿电池分为单结钙钛矿与叠层钙钛矿（多结）两类。纯钙钛矿电池可分为 n-i-p 和 p-i-n 两种器件结构，其中 n-i-p 结构是指电子传输层-钙钛矿层-空穴传输层的器件结构，p-i-n 结构是指空穴传输层-钙钛矿层-电子传输层的器件结构，其中 n-i-p 器件结构较为常见。但由于 p-i-n 结构制备工艺简单，成本低，可用于钙钛矿-钙钛矿叠层器件的制备，因此越来越受到科研者们的关注。

图38：nip 结构（正式结构）



资料来源：知研光电材料，民生证券研究院

图39：pin 结构（反式结构）



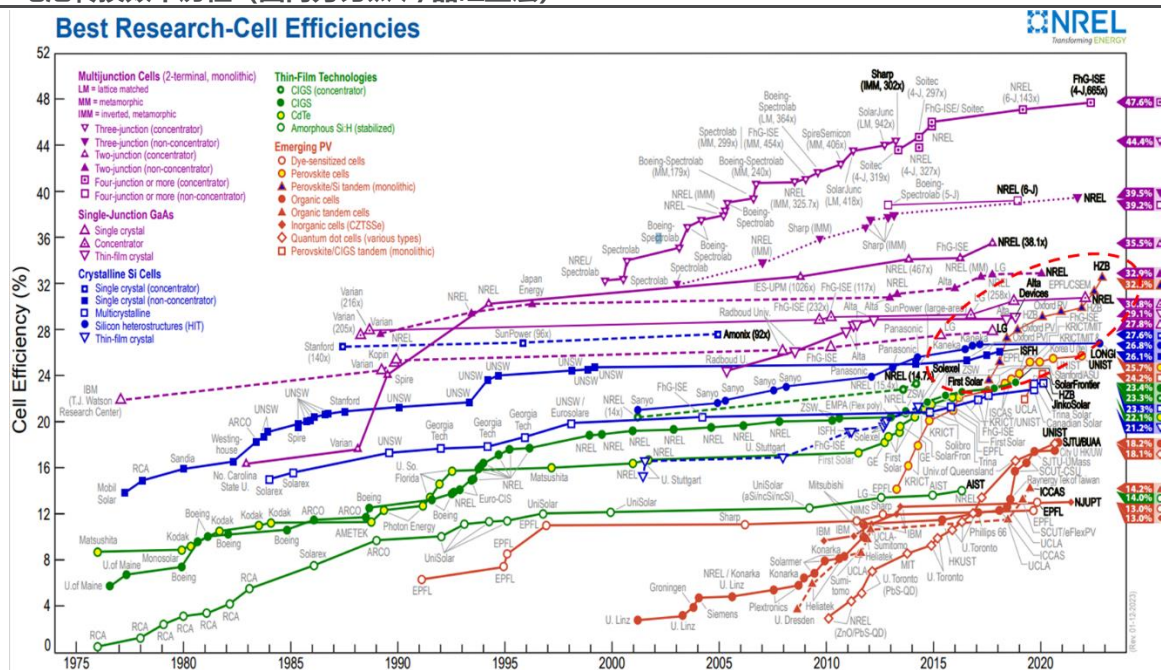
资料来源：知研光电材料，民生证券研究院

叠层钙钛矿电池结构

连续可调的带隙宽度使得钙钛矿适合做叠层多结电池，优势在于其它类型太阳能电池集成以后可以捕捉和转换更宽光谱范围的太阳光，提升电池转换效率。

叠层的技术方向主要分为两类，钙钛矿/晶硅叠层电池、钙钛矿/钙钛矿叠层电池。对于钙钛矿/晶硅叠层电池，钙钛矿可以与 HJT、Topcon 等晶硅电池组成叠层电池。简单来说，是指将钙钛矿电池串联在晶硅电池表面。钙钛矿/硅串联太阳能电池结合了晶硅、薄膜电池的优点，通过组合的优势，拓宽了吸收光谱，获得比单纯晶硅电池或钙钛矿电池更高的光电转化效率。EcoMat 研究表明钙钛矿/硅串联太阳能电池的理论效率极限为 46%，远高于传统晶硅电池；而根据 NREL 统计的最新实验室数据，钙钛矿/晶硅叠层转化效率快速提升，明显超过单晶硅电池。

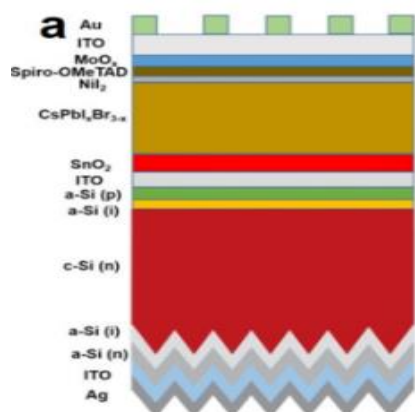
图40：电池转换效率历程（圈内为钙钛矿/晶硅叠层）



资料来源：NREL，民生证券研究院

钙钛矿/硅叠层太阳能电池有多种配置方式，常见的配置方法有二端叠层（2T）与四端叠层（4T）。

图41：两端叠层电池结构



资料来源：《eScience 研究论文|首块无机钙钛矿/晶硅两端叠层电池》，民生证券研究院

从工艺难度来看，最容易实现的是机械堆叠的四端叠层电池。四端叠层电池的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，因此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。

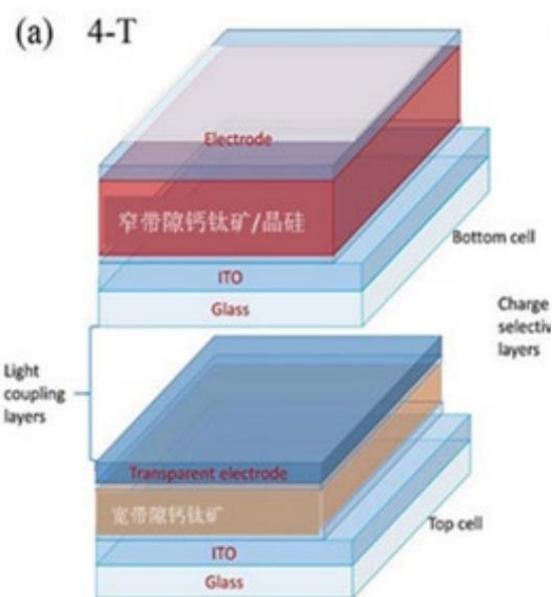
两端叠层电池在硅电池上直接沉积钙钛矿电池制成，通过复合层或隧道结将两个子电池串联连接。与机械堆叠的四端电池相比，这种两端架构只需要一个透明电极，由于更少的电极材料使用和更少的沉积步骤，两端电池的制造成本极大的降低了。两端叠层电池也有一些限制：由于直接在硅电池顶部沉积钙钛矿电池，硅电池顶部陷光结构的制作和表面钝化设计将会更加困难。因为不规则的表面不利于沉积规则的钙钛矿薄膜，沉积工艺也可能破坏硅的上表面钝化层。

此外三端结构作为一种全新的设计思路逐渐进入了研究者的视野，2017 Werner 课题组提出了将叉指式背接触硅（IBC）电池与宽带隙顶部电池相结合制造的三端结构叠层电池，并通过二维器件物理模型研究了三端配置下叠层电池的运行。

Topcon 钙钛矿叠层 与 HJT 钙钛矿叠层比较

一般来说，相比 Topcon 电池，异质结电池与钙钛矿电池进行叠层更为理想。

图42：四端叠层结构



资料来源：《钙钛矿与叠层电池产业化最新进展》，民生证券研究院

图43: 4t 钙钛矿/Topcon 叠层

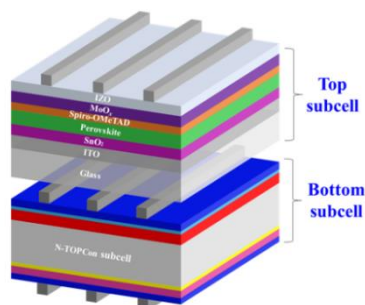
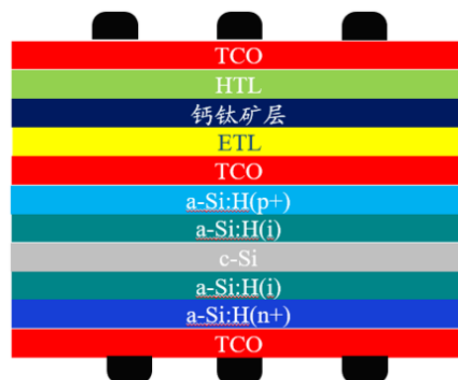


图44: 钙钛矿/HJT 叠层



资料来源:《公司携手研发的钙钛矿/晶硅叠层电池转换效率创新高》, 民生证券研究院

资料来源:《新型薄膜太阳能电池》, 民生证券研究院

一是异质结电池结构相比 Topcon 电池本身更适合叠层: 因为钙钛矿电池与异质结电池进行叠层, 异质结电池表面本身就是 TCO, 异质结电池的产线无需做更改, 而 Topcon 电池与钙钛矿电池进行叠层, Topcon 正面的氮化硅和氧化铝由于是绝缘体不能导电, 需要先把氧化铝和氮化硅去掉, 或加入进一步掺杂和钝化工艺;

二是 Topcon 电池与钙钛矿电池进行叠层的话自身基于电流高的效率优势会被浪费: 从实际量产效率来看, Topcon 和异质结相差不大, 但效率的构成参数不同, 异质结电池电压高, 电流低, Topcon 电池开压不高, 但电流比较高, 主要原因因为异质结表面 TCO 的透光性不如 Topcon 表面的氮化硅。如果做叠层电池, 异质结受光面 TCO 依然是 TCO, Topcon 表面也需要变成 TCO, 那么 Topcon 电池本身电流高的优势就没有了, 理论上钙钛矿-Topcon 叠层电池的效率相比 HJT-钙钛矿叠层电池更低。不过钙钛矿-Topcon 叠层电池依然值得关注, 2022 年 6 月, 澳大利亚国立大学 Klaus Weber, 北京大学周欢萍以及晶科能源 Peiting Zheng 等人使用 Topcon 晶硅电池作为底部电池, 以及钙钛矿薄膜作为顶部电池, 制备了单片钙钛矿/Topcon 叠层器件。该器件的效率为 27.6%。

三是钙钛矿/HJT 叠层电池为串联结构, 输出超高电压提高转换效率。钙钛矿与异质结具有良好的叠层电池匹配度, 可形成较单结 PSCs 效率更高的叠层电池。异质结是指将 P 型半导体与 N 型半导体制作在同一块硅基片上, 在交界面形成的空间电荷区 (PN 结), 具有单向导电性。具有本征非晶层的硅异质结电池片中同时存在晶体和非晶体级别的硅, 非晶硅能更好地实现钝化效果, 提高开路电压和转换效率。叠层电池根据禁带宽度从小到大, 可依次将不同材料按从底向顶顺序而组成。叠层电池上面是钙钛矿电池, 底下是异质结电池, 钙钛矿吸收中短波长的光, 中长波的光透过钙钛矿由异质结吸收, 通过光学和叠层的设计来输出超高电压。在转化率贡献上, 异质结可以贡献 25%-26%的转化率, 而钙钛矿叠层则是增加其 3%-5%增量效益。值得注意的是, 由于钙钛矿电池与硅异质结电池均为 P-N 结构,

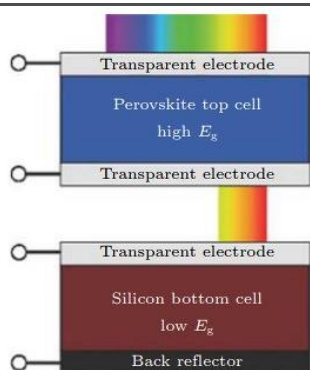
如果将二者直接串联，接触界面会形成反 PN 结，导致电压相互抵消而不导电，需要增加过渡层，隧穿结或过渡层也是 P-N 结构，过渡层需要同时满足可导电、透光性好、有一定厚度几个条件，来联接两个子电池。

5.2 学术界进度汇总

5.2.1 钙钛矿/硅叠层太阳能电池的多种配置方式

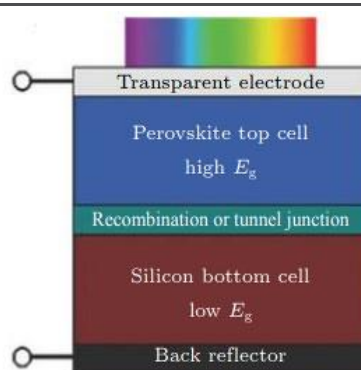
钙钛矿/硅叠层太阳能电池有多种配置方式，常见的配置方法有二端叠层（2T）与四端叠层（4T）。

图45：四端式钙钛矿硅叠层电池结构图



资料来源：《钙钛矿硅异质结叠层太阳能电池光学模拟的研究进展》，民生证券研究院

图46：两端式钙钛矿硅叠层电池结构图



资料来源：《钙钛矿硅异质结叠层太阳能电池光学模拟的研究进展》，民生证券研究院

根据电子科技大学研究成果《钙钛矿/硅叠层太阳能电池的研究》中所述，从**工艺难度来看，机械堆叠的四端叠层电池较为容易实现**。四端叠层电池的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，因此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。

两端叠层电池在硅电池上直接沉积钙钛矿电池制成。采用四端架构意味着四个电极中的三个需要使用透明电极，与机械堆叠的四端电池相比，这种两端架构只需要一个透明电极，**由于更少的电极材料使用和更少的沉积步骤，两端电池的制造成本降低**。

但两端叠层电池也有一些限制：由于两个子电池串联连接，子电池必须被设计为在工作时有相似的光电流，因为串联的子电池电流受电流较低的子电池限制。电流匹配要求会将顶电池理想带隙限制在 1.7~1.8 eV 的狭窄范围内，为制备高效率叠层电池带来较大的难度。电流匹配的限制使得设计两端叠层电池时需要针对不同地理位置的光谱条件做出细微调整，才能获得最大的功率输出。同时由于直接在硅电池顶部沉积钙钛矿电池，硅电池顶部陷光结构的制作和表面钝化设计将会更

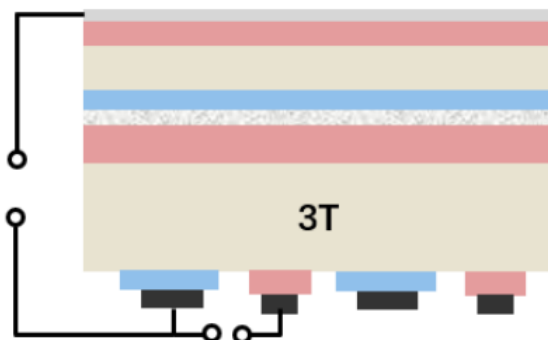
加困难。因为不规则的表面不利于沉积规则的钙钛矿薄膜，沉积工艺也可能破坏硅的上表面钝化层。

4T 结构相关研究统计：首个钙钛矿/硅四端叠层电池在 2014 年由斯坦福大学 Bailie 教授的课题组开发，结合 MAPbI₃ 钙钛矿电池与多晶硅下电池并获得了 17% 的效率。2016 年 Doung 等人首次将 ITO 透明电极用于四端叠层电池，获得了 20.1% 的效率，使用了 ITO 电极的钙钛矿上电池拥有超过 80% 近红外光谱的透射率。2018 年 Zhang 等人通过在 IBC 电池顶部加入近红外透射率 92% 的钙钛矿顶部电池，使四端叠层电池效率提升至 25.7%。2020 年宾夕法尼亚大学的 Yang 课题组使用超薄金薄膜作为顶部电极，使四端叠层电池的效率记录提高到了 28.3%。

2T 结构相关研究统计：2015 年，MIT 大学的 Maillor 课题组首次制备了两端叠层电池，光电转化效率 13.7%。2016 年 Werner 课题组提出了一种使用氧化锌锡 (IZO) 作为复合层的两端叠层电池，在当时先进钙钛矿电池制备所需的 500°C 高温工艺中保护硅电池。2018 年南威尔士大学的 Zheng 团队首次将低温处理 (<150°C) 钙钛矿太阳能电池集成到硅太阳能电池上，并使用 SnO₂ 作为钙钛矿的电子传输层以及复合层，使大面积 (4cm²) 两端叠层电池获得了 21% 的效率。目前柏林亥姆霍兹中心 (HZB) 的研究者在 2020 年制造出的 29.8% 效率的两端叠层电池保持着钙钛矿/硅叠层电池的效率记录。

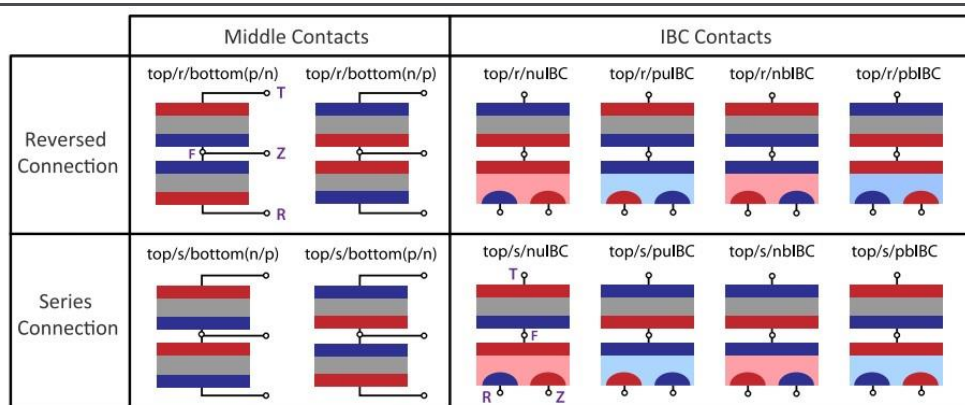
为了克服 2T 和 4T 结构的弊端，近年来，三端结构 (3T) 作为一种全新的设计思路逐渐进入了研究者的视野。2017 年 Werner 课题组提出了将叉指式背接触硅 (IBC) 电池与宽带隙顶部电池相结合制造的三端结构叠层电池，并通过二维器件物理模型研究了三端配置下叠层电池的运行。3T 结构能减少 2T 和 4T 本身的缺陷。但是，3T 结构通常需要交叉指式背接触技术 (IBC)，需要高质量的材料（例如具有较长扩散长度的 n 型材料），暂时难以大量生产的低成本的电池。

图47：三端式钙钛矿硅叠层电池示意图



资料来源：《钙钛矿硅叠层太阳能电池的研究》，民生证券研究院

图48：学术界三端式叠层电池的各类结构示意图



资料来源：《A Taxonomy for Three-Terminal Tandem Solar Cells》，民生证券研究院

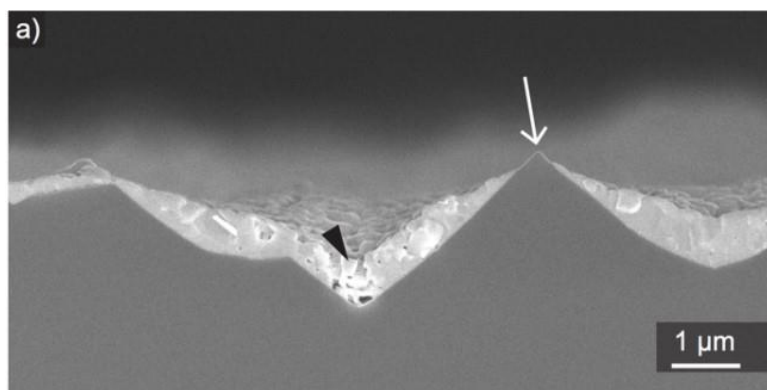
5.2.2 钙钛矿/硅叠层太阳能电池的电池效率提升

要提高叠层电池的光电转换效率，关键是提高电池的开路电压、短路电流密度以及填充因子，减少电池的光学及电学损耗。其中，提高电池短路电流密度的方法主要是降低寄生吸收损耗及反射损耗，同时提高顶电池和底电池电流密度匹配度；提高开路电压的方法主要是提高宽带隙钙钛矿电池的开路电压；最后提高填充因子的方法是减少电阻损耗及漏电击穿。

减少寄生吸收损耗的主流方案是采用 p-i-n 结构的顶电池。太阳电池中非活性层的对光的吸收称为寄生吸收，这些吸收对太阳电池中的短路电流密度没有贡献。研究发现，采用 p-i-n 结构的钙钛矿顶电池，能显著降低载流子传输层的寄生损失。2017 年，Bush 课题组采用 p-i-n 结构钙钛矿顶电池，大大改善了 Spiro-OMeTAD（常用的电荷传输层材料）的寄生吸收，结合晶硅底电池的硅纳米颗粒/Ag 复合层背反结构，实现 $J_{SC} = 18.1\text{mA/cm}^2$ 、 $PCE = 23.6\%$ 。目前，高效叠层电池基本采用 p-i-n 结构的钙钛矿顶电池。

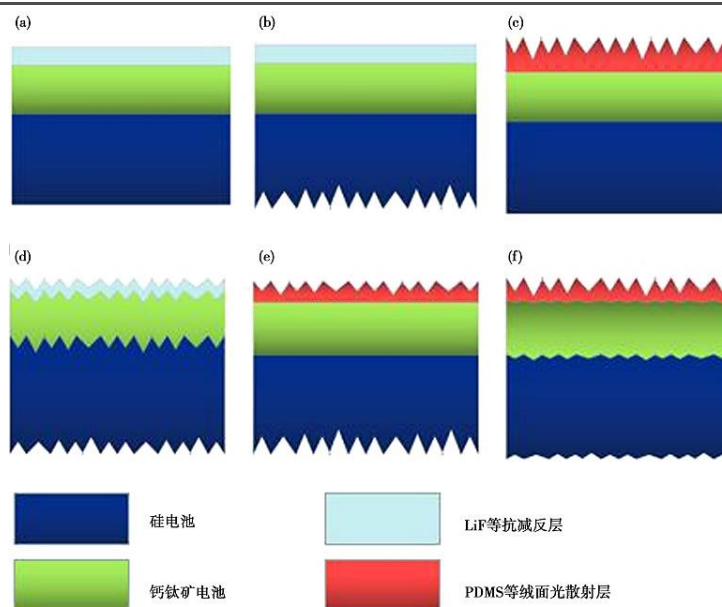
减少反射损耗的途径通常有两种：一是在器件前表面设计一层减反层增加前表面的抗反射能力，进而减少逃逸出器件的光；二是使用绒面结构，使进入器件的光吸收最大化。2018 年，瑞士 EPFL 的 Ballif 课题组通过物理沉积+溶液涂层的组合，先用共蒸法将碘化铅框架镀到金字塔结构上，在用溶液法涂覆有机卤化物，沉积出高质量薄膜，避免只用溶液法时溶液受重力影响聚集在金字塔谷底，导致成膜不均匀的问题。

图49：绒面硅片上直接使用溶液法处理时成膜的不均匀现象



资料来源：《Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency》，民生证券研究院

图50：两端式钙钛矿/硅叠层电池中常用的陷光策略示意图



资料来源：《高效钙钛矿太阳能电池及其叠层电池研究进展》，民生证券研究院

提高叠层电池的开路电压，关键是提高宽带隙钙钛矿顶电池的开路电压。目前高效两端叠层电池的顶电池普遍采用 1.60~1.65 eV 带隙的顶电池，钙钛矿电池开压约为 1.1 V，叠层晶硅底电池拥有 0.7 V 的开压，叠层电池开压最高为 1.8 V，而理论模拟最优的 1.7~1.75 eV 开压的钙钛矿电池没有在叠层电池中成功应用。其原因主要是两个方面：首先宽带隙的钙钛矿顶电池没有达到预期的高开路电压，1.7 eV 宽带隙钙钛矿电池的开压仅在 1.2 eV 左右，开压和带隙存在约 0.5 eV 的差距，而常规 1.55 eV 带隙的高效钙钛矿电池的开压与带隙只有 0.4 eV 的差距，因此，宽带隙钙钛矿电池的开压还有很大的提升空间。其次，两端叠层电池还存在顶电池和底电池电流密度匹配要求。根据理论模拟， $E_g > 1.7$ eV 的钙钛矿顶电池要与晶硅底电池实现电流匹配，需要的厚度超过 1 μm，然而该厚度的高质量钙钛矿

层目前无法制备。相对而言, 1.6 eV 钙钛矿电池能较好地与底电池实现电流匹配, 这也是目前大部分高效叠层电池采用带隙 1.6~1.65 eV 钙钛矿顶电池作为折中手段的原因。因此, 提高微米级厚度的宽带隙钙钛矿电池的光电性能, 是进一步提高叠层电池性能的关键。

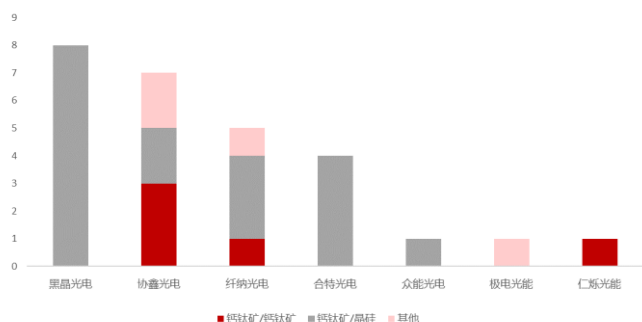
除了叠层电池的高效化研究外, 开展高效叠层电池的大面积均匀制备工艺以及稳定性研究也至关重要。目前, 透明电极的磁控溅射或热蒸发技术, 以及钙钛矿及载流子传输层的狭缝式涂布技术, 都有望实现大面积均匀制备。在 156 cm×156 cm 的大面积晶硅电池上叠加钙钛矿组件, 是大面积叠层电池切实可行的制备方法。另外, 钙钛矿电池还面临稳定性的挑战, 其容易受到光、热、水、氧等影响, 特别是宽带隙钙钛矿电池的相不稳定性尤为突出。因此, 需要通过钙钛矿层及载流子传输层特性, 以及有机无机界面特性的调控, 抑制碘离子的迁移, 提高宽带隙钙钛矿电池的稳定性, 从而达到可与晶硅底电池匹配的寿命。

5.3 产业进度汇总

5.3.1 钙钛矿电池厂商专利布局

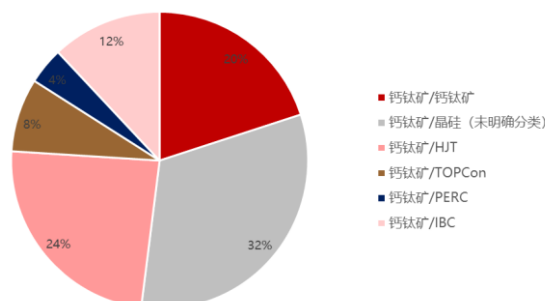
从叠层电池种类来看, 目前钙钛矿/晶硅叠层电池的专利数更多, 许多钙钛矿电池厂商持有相关专利, 如黑晶光电、协鑫光电、纤纳光电、合特光电、众能光电等。全钙钛矿叠层电池的专利数并不多, 目前仅有协鑫光电、纤纳光电和仁烁光能持有全钙钛矿叠层电池专利。从叠层电池专利占比来看, 钙钛矿/晶硅叠层占比较大, 其中, 钙钛矿/HJT 叠层电池的专利数较多, 其次是钙钛矿/钙钛矿叠层电池。从专利整体布局来看, 目前产业端对于全钙钛矿叠层电池和钙钛矿/HJT 叠层电池的关注度更高。

图51: 截至 2023 年 2 月钙钛矿电池厂商叠层电池专利(个)



资料来源: 爱企查, 民生证券研究院

图52: 截至 2023 年 2 月各叠层电池专利数占比 (%)



资料来源: 爱企查, 民生证券研究院

产业内钙钛矿叠层电池领域大多还在实验室测试阶段。根据 2 月 16 日仁烁光能的公开信息, 仁烁光能建设的全球首条全钙钛矿叠层光伏组件研发线正式投产,

组件尺寸 30*40cm²，目前 10MW 研发中试线已全线跑通。除此以外，合特光电也计划进行钙钛矿/HJT 电池中试线。

表10：钙钛矿电池公司近期动态

公司	时间	相关新闻
纤纳光电	2022 年 2 月 2 日	中国长江三峡集团科学技术研究院与杭州纤纳光电科技有限公司联合开发的 钙钛矿-晶硅四端子叠层组件 ，经泰尔实验室（嘉兴）测试认证，在面积约为 20cm ² 的组件上获得了 26.63%的转换效率，该结果是目前全球四端子叠层组件转换效率的最好成绩。此次检测的叠层组件结构是由钙钛矿组件和 PERC 晶硅组件叠加而成。其中，钙钛矿组件作为顶电池贡献了 16.86%的效率，而 PERC 晶硅组件作为底电池贡献了 9.77%的效率。
合特光电	2022 年 6 月 20 日	公司的子公司合特光电计划在 2022 年底投产首条 异质结/钙钛矿叠层 电池中试线，目标效率 28%以上，一旦该生产线顺利投产，将大幅增加公司产品市场竞争力。
仁烁光能	2023 年 1 月 1 日	1 月 1 日，经日本 JET 第三方认证，仁烁光能研发的 全钙钛矿叠层电池 稳态光电转换效率达到 29.0%，再次打破团队在 2022 年 6 月创造的 28.0%的世界纪录，这也是其第七项被收录的叠层电池世界纪录。量产方面，仁烁光能 150MW 中试线预计在 2023 年三季度投产，2024 年实现量产。若中试线的调试结果符合预期，仁烁光能将进行 GW 级的产能规划。
曜能科技	2023 年 1 月 20 日	1 月 20 日，经中国计量院认证，曜能科技自主研发的小面积 钙钛矿、晶硅两端叠层电池 稳态输出效率达到 32.44%，刷新国内纪录。两周之后，曜能科技再次宣布，经中国计量院认证，公司自主研发的 25cm ² 大面积钙钛矿/晶硅两电极叠层电池器件稳态效率达到 29.57%，为目前报道的大面积叠层电池最高效率。据曜能科技介绍，25cm ² 电池器件是验证工业级规格电池工艺可行性的重要节点，目前公司已完成从基本材料配方和工艺方法到整体资源配套和研发思路的颠覆性跨越。
黑晶光电	2023 年 1 月 31 日	1 月 31 日，皇氏集团宣布与黑晶光电达成技术合作，拟共同推进 Topcon/钙钛矿叠层电池 产品技术的研发、生产及产品应用。黑晶光电成立于 2019 年，专注于钙钛矿叠层电池技术的研发与生产。根据黑晶光电官网披露的信息，其研发的 串联型钙钛矿/PERC 叠层电池 转换效率达到 26.5%。

资料来源：合特光电公告、纤纳、仁烁、曜能、黑晶微信公众号，民生证券研究院

5.3.2 钙钛矿叠层电池产业化难点

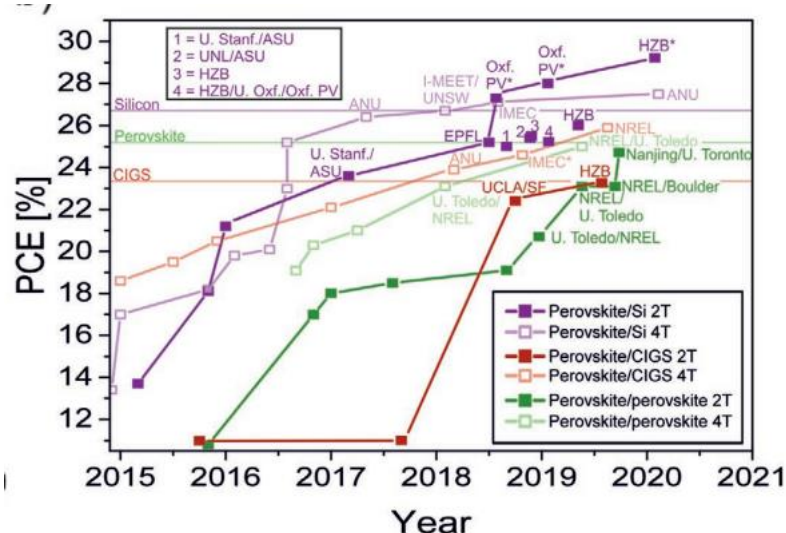
对于**全钙钛矿叠层电池**来说，在早期研究中，由于窄带隙钙钛矿层的扩散层较薄、表面缺陷较多以及稳定性不佳等问题，限制了叠层电池的效率提升。目前，实验室已经能基于小面积组件获得较高效率，但是工业化大面积制备仍存在难点。实验室基本用旋涂法制备钙钛矿层，但是产业中广泛应用制备钙钛矿薄膜的印刷涂布或真空沉积技术难以控制宽带隙钙钛矿的结晶，制备的膜存在不连续、疏松多孔、凹凸不平的现象。同时，钙钛矿易氧化的现象需要制备及封装时严格控制无氧

状态，对于目前的技术来说所花费成本较大。

对于钙钛矿/晶硅叠层电池来说，目前的难点在于控制量产成本。一方面，目前实验室高效率基本上基于完全抛光、精密的硅底电池，成本较高，量产上难以接受。另一方面，如果采用异质结电池作为硅底电池，利用其上下金字塔形状制绒，虽然硅底的成本降低，但是钙钛矿层的制备难度却增加。

从叠层电池的结构来说，有两端电池(2t)和四端电池(4t)两种较为主流的结构。从效率上来说，目前两种结构的叠层电池没有较大的区别。

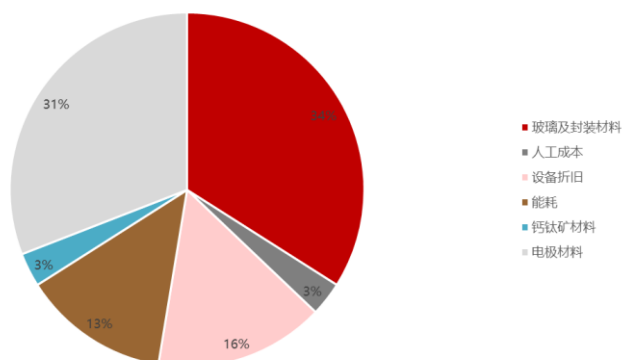
图53：学术界 2T/4T 结构叠层电池转换效率表



资料来源：《Advanced Energy Materials - 2020 - Jo t - Monolithic Perovskite Tandem Solar Cells A Review of the Present Status and》，民生证券研究院

但从制备工艺上来说，四端电池中两个子电池需要单独制备的，两端电池中间需要通过复合层来连接整个电池。从技术难度上来说，四端电池分别制备两个电池是比较简单的，而两端电池需要考虑顶底电池电流匹配问题，技术相对复杂。但从成本角度来看，四端电池需要至少 3 个透明电极，封装的成本比较高，而两端叠层只需要一个复合层和一个透明电极，成本会相对低一些。而钙钛矿电池的成本中，透明电极成本占比较高，减少透明电极的使用至关重要（玻璃+电极材料共同构成透明电极）

图54：钙钛矿电池成本拆分（协鑫光电估算 100MW 标准线数据）



资料来源：协鑫光电，华尔街见闻，民生证券研究院

考虑到**兼容性问题**，由于四端电池相当于有两个正极和负极，与现有电站匹配存在较大的问题，而两端电池作为一个整体，兼容性可能更高（但未来也有望通过组件内部串联的方式，将 4T 的组件优化为 2T 组件解决兼容性问题）。

6 对未来的思考：跨界与并存

蒸镀、涂布等镀膜技术除了应用于钙钛矿电池，也在半导体光刻胶、OLED 显示、锂电池等领域发挥关键作用。在镀膜技术、镀膜设备等方面与钙钛矿电池有相似和不同之处。

6.1 半导体光刻胶

根据应用领域，光刻胶可分为半导体光刻胶、LCD 光刻胶和 PCB 光刻胶，技术壁垒依次降低。

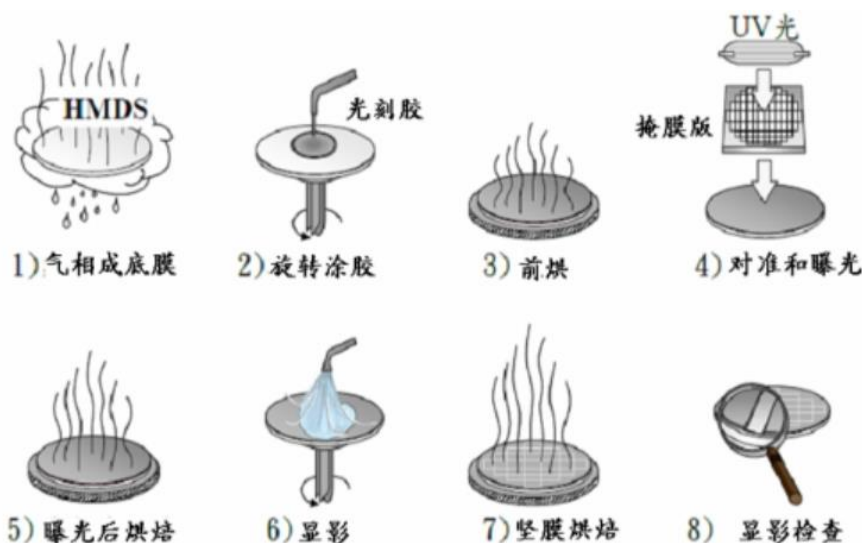
图55：光刻胶产业链



资料来源：《光刻胶概述》，民生证券研究院

光刻工艺是半导体制造的核心工艺，半导体光刻制程通常遵循八步基本工艺，包括衬底的准备、半导体光刻胶涂覆、软烘焙、曝光、曝光后烘培、显影、硬烘焙和显影检测。

图56：光刻过程



资料来源：时代芯存科普系列——光刻工艺简介，民生证券研究院

其中光刻胶涂布是光刻工艺的基础，涂布后的膜厚品质直接影响后续工序，半导体里面因为硅片较小，一般以旋涂法涂胶：

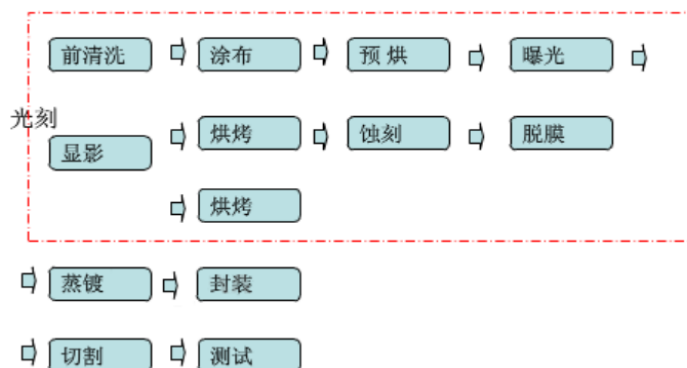
首先将光刻胶溶液喷洒在硅片表面，将硅片放在一个平整的金属托盘上，加速旋转托盘，直到达到所需的旋转速度。托盘内有小孔与真空管相连，由于大气压力的作用，硅片可以被“吸附”在托盘上，这样硅片就可以与托盘一起旋转。达到所需的旋转速度之后，以这一速度保持一段时间，以旋转的托盘为参考系，光刻胶在随之旋转受到离心力，使得光刻胶向着硅片外围移动。

涂布机以外，晶圆烘干箱也是半导体制作中的重要设备，主要应用于半导体晶圆片光刻涂胶镀膜前的基片清洗后的前烘烤(Pre baking)、涂胶后的软烘焙，曝光、显影后的坚膜硬烘等工艺。如，为获得平坦而均匀的光刻胶涂层并使光刻胶与晶片之间有良好的黏附性，通常在涂胶前对晶片进行预处理，常是脱水烘烤，在真空或干燥氮气的机台中，以 150 ~ 200℃烘烤。涂胶后，晶片也须经过一次烘烤，称之为软烘或前烘。工艺作用是除去胶中大部分溶剂并使胶的曝光特性固定。

6.2 OLED 显示

图57：OLED 工艺流程

OLED工艺流程

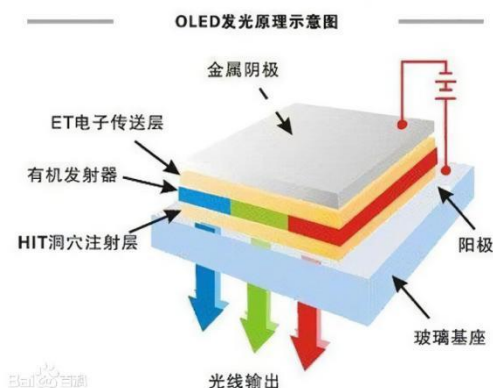


资料来源：《关于 OLED 制程中的光刻技术》，民生证券研究院

光刻胶也是印制线路板（PCB）、LCD、OLED 等应用行业的关键上游材料，OLED、液晶显示领域刷光刻胶与钙钛矿电池涂布方式相似。目前 G4.5 以上生产线基本都是采用狭缝式光刻胶涂布方式，其工作原理是通过硅胶定量泵，将光刻胶从涂布头的狭缝挤出，涂布头与玻璃基板之间保持一定的高度，形成光刻胶帘，涂布头移动，将光刻胶均匀的涂抹在基板上，形成工艺所需的光刻胶膜层，为后面制程提供保证。

此外，OLED 与钙钛矿整线相似有 HTL/ETL 层，并主要运用真空蒸镀技术进行镀膜。

图58：OLED 发光原理示意图



资料来源：《OLED 发光原理，结构及关键技术深度图文解析》，民生证券研究院

图59：OLED 发光原理示意图



资料来源：《OLED 真空蒸镀技术简介》，民生证券研究院

OLED 由在玻璃基板上发射红色（R），绿色（G）和蓝色（B）的有机发光层，以及用于保护有机发光层的结构组成。形成有机层的最常用的方法是“蒸镀”，发

光材料，金属电极等等都主要通过蒸镀完成，实际操作非常复杂，比如如何控制像素区域，像素要怎么对齐，还有控制蒸上去的薄膜厚度，什么前处理、蒸镀室的真空度等。

图60：OLED 蒸镀概念图

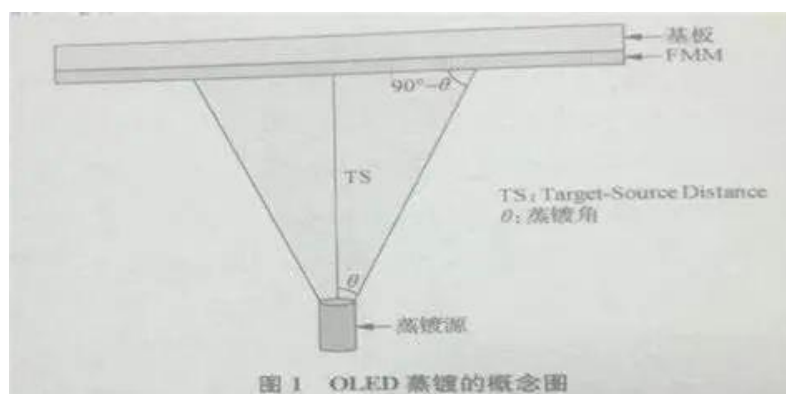


图1 OLED 蒸镀的概念图

资料来源：《OLED 真空蒸镀技术简介》，民生证券研究院

基本的 OLED 蒸镀工艺，首先从去除 LTPS（包含阳极）基板上的污垢和杂质的工作开始。在清洗和干燥衬底之后，使用 plasma 去除阳极残留物质，并且改善从阳极到 HIL 的空穴注入特性。然后，全面蒸镀 HIL（空穴注入层），然后在蒸镀 HTL（空穴传输层）以形成辅助层。

接下来就是实际发光的 EML 层，需要使用掩模选择性地沉积在期望的位置。

随后，蒸镀 ETL（沉积电子传输层）和 EIL（电子注入层）以形成电子传输的辅助层，最后蒸镀阴极，从而完成有机发射层的整个沉积过程。

相比钙钛矿电池，OLED 蒸镀工艺更为复杂。OLED 对膜层薄度、膜厚均一性、腔体洁净等级要求更高，并且采用六叠层结构，OLED 层数更多，掺杂比例更低。长期以来，这项科技在国外公司更有优势，全球蒸镀机（尤其蒸镀封装一体机）生产长期被日本佳能公司 Canon Tokki 垄断。直至 2019 年 10 月，我国首条 OLED 蒸镀量产线成功点火，表明了我国成功突破技术壁垒，能够生产出自己的真空蒸镀机。经过多年的研发，合肥莱德、合肥欣奕华等业内公司不断进行技术突破，生产更新了众多高质量的 OLED 真空镀膜机，在钙钛矿电池生产中也有产线应用了合肥欣奕华的真空镀膜设备。

6.3 锂电池

锂电池按照生产工艺和流程划分可分为前、中、后三个阶段。

前段工序的目的是将原材料加工成为极片，其核心工序就是涂布；中段工序的目的是将极片加工成为未激活电芯，核心工序是卷绕或者叠片；后段工序的目的是激活电芯、检测等级容量，核心工序是化成和分容。对应各生产工序，所需锂电设备同样可以划分为前中后三段，涂布机为锂电池生产的前段设备，构造与钙钛矿电

池制备所需涂布机相似，分为收-放卷系统、涂布系统、烘干系统等。

图61：锂电池工艺流程图



资料来源：《锂电成型之涂布烘烤》，民生证券研究院

锂离子电池极片涂布的特点有：1) 双面单层涂布；2) 浆料湿涂层较厚(100 ~ 300 μ m)；3) 浆料为非牛顿型高粘度流体；4) 极片涂布精度要求高，和胶片涂布精度相近；5) 涂布支持体为厚度 10 ~ 20 μ m 的铝箔和铜箔；6) 和胶片涂布速度相比，极片涂布速度不高。

综合、上因素考虑，一般实验室设备往往采用刮刀式，消费类锂离子电池多采用辊涂转移式，而动力电池多采用狭缝挤压式方法。

6.4 当前钙钛矿产线各层镀膜仍是多工艺并存发展

当前，钙钛矿层电池的光电转换效率已经可以和传统的晶硅太阳能电池相媲美，大面积、高效率、高稳定性模组的制备技术是未来商业化应用的必经之路。作为钙钛矿电池中最重要的活性层，大面积、高质量钙钛矿薄膜沉积技术也将成为各大光伏厂商的核心竞争力。基于对溶液涂布法与真空蒸镀法的原理、工艺、特性分析，我们认为涂布法和蒸镀法之间不存在绝对的优劣关系，存在各自的适用场景。未来这两种技术将共同推动光伏技术产业化的迅速发展。

7 相关标的

7.1 京山轻机

7.1.1 京山轻机钙钛矿相关业务简介

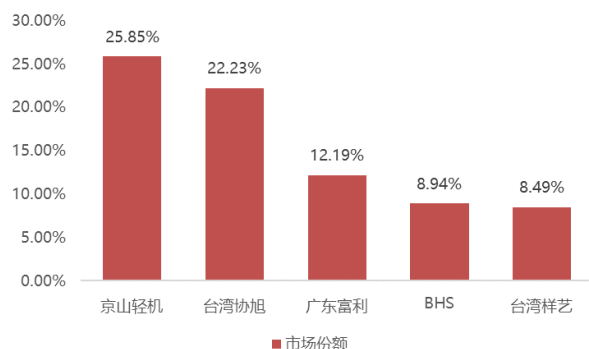
公司是中国领先的纸箱、纸盒包装机械研发、制造和出口基地，瓦楞机械设备和后续加工设备制造商。公司主业从纸制品包装机械发展到目前涵盖包装机械、汽车零部件制造、人工智能和工业自动化行业等多项业务。公司通过对人工智能在工业领域的研究和运用，为客户提供个性化、多样化、智能化、自动化生产整体解决方案。工业自动化生产业务主要为制造业生产用于替代人工生产的自动化生产线，涵盖 3C 电子、食品和建材家居等行业。公司通过重大资产重组收购苏州晟成 100% 股权，新增光伏组件自动化生产线设备产品，营业收入规模有较大提升

在钙钛矿领域，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。1) 钙钛矿 PVD 镀膜设备，具备完全自主知识产权，是用于钙钛矿电池制备过程中沉积电子传输层（ETL）或空穴传输层（HTL）的镀膜设备。作为钙钛矿设备领域的先行者和领导者，公司团队率先具备 PVD 镀膜设备的研发经验和交付经验，并已具备成熟的供货能力。2) 钙钛矿团簇型多腔式蒸镀设备，具备完全自主知识产权，是用于钙钛矿电池制备过程中钙钛矿材料及金属电极材料的蒸镀设备。公司经过长时间研发及实验数据验证，突破技术难关。该设备现已量产，并成功应用于多个客户端。

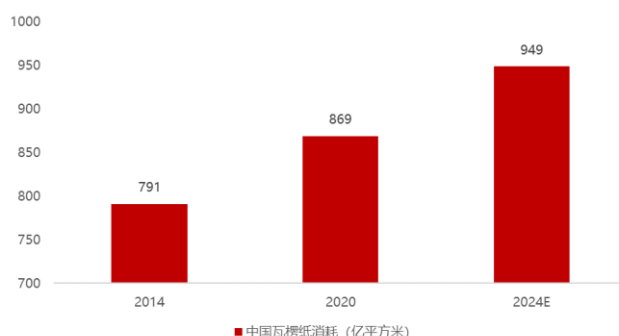
7.1.2 京山轻机业绩预测

公司是国内最早从事瓦楞纸包装智能成套装备研发、设计和生产的公司之一，深耕瓦楞纸包装设备领域近五十年，为瓦楞纸包装行业龙头企业，拥有齐全的产品线，以及数量巨大的存量客户，包括国内瓦楞包装上市龙头企业合兴包装、美盈森以及海外瓦楞包装龙头 Smurfit Kappa 集团、Pratt Industries 等。据纸业网统计，京山轻机 2019 年市占率已超 25%，达国内第一，长期以来包装业务稳健。

从下游应用行业来看，根据中国包装联合会统计数据来看，中国瓦楞纸板市场由 2014 年的 791 亿平方米增至 2020 年的 869 亿平方米，复合年增长率为 1.58%，预计 2024 年前将进一步增至 949 亿平方米，年增长率 3.0%。随着电商和快递行业的快速发展，以及国家推进快递包装绿色转型的利好政策出台，国内瓦楞纸需求将保持增长，京山轻机未来发展受益。同时瓦楞纸箱生产行业将进入集团化、规模化发展阶段，由同一供应商提供一体化的解决方案已成为瓦楞纸设备业发展趋势，技术积累深厚的京山轻机在竞争中处于优势地位。

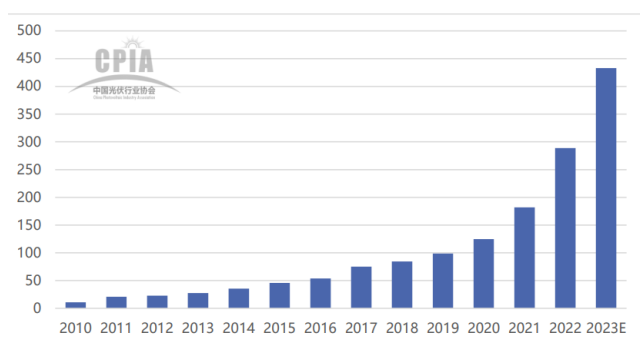
图62：2019 年瓦楞纸包装设备 TOP5 公司市场份额


资料来源：纸业网，民生证券研究院

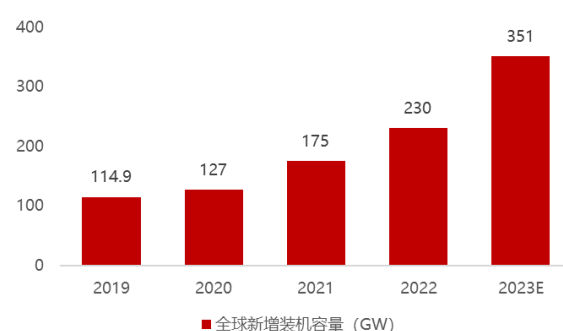
图63：2014-2024E 瓦楞纸包装市场规模（亿平方米）


资料来源：前沿研究院，民生证券研究院

光伏业务方面，公司主要业务为组件环节的自动化设备。从行业增速来看，组件方面，2022 年全国组件产量达到 288.7GW，同比增长 58.8%，以晶硅组件为主。其中，排名前五企业产量占总产量的 61.4%，产量达 5GW 以上的组件企业有 11 家。CPIA 预计 2023 年组件产量将超过 433.1GW，同比增长 50.1%。根据 CPIA 最新统计，2022 年全球光伏组件装机量 230GW，同比增长 31%；TrendForce 预计 2023 年全球光伏装机量达到 351GW，同比增长 53%

图64：2010-2023E 全国光伏组件产量（GW）


资料来源：CPIA，民生证券研究院

图65：2019-2023E 全球光伏装机量（GW）


资料来源：TrendForce，民生证券研究院

1) 包装设备业务：公司将继续针对包装设备业务推行高端精品战略、国际化战略与品牌化战略，进一步加大资源投入，我们认为除 2022 年受疫情冲击外，未来此板块业务收入将趋于稳定。预计 2023/2024 年该业务营收增速约为 10%/5%。此外成熟业务毛利率也会维持稳定，2023/2024 年为 20%/20%

2) 光伏设备业务：近两年以来公司在手订单量持续增长，且下游光伏组件的产品量，全球光伏装机量仍处于较高的增速区间。根据 CPIA 数据，2022/2023 年光伏组件产量的增速 58.8%/50.1%，生产端景气度较高，同时 TrendForce 预计

2023 年全球组件装机量增速 53%，表面需求同样仍处于较高的景气度区间。公司的光伏设备主要集中在组件环节，我们预计该业务在 2023 年仍会保持较高的增速，2024 年由于基数较大，增速会略有放缓，对应 2023/2024 年该业务营收增速约为 45%/20%。同时光伏行业目前组件环节的技术迭代也趋于稳定，毛利率相对平稳，对应 2023/2024 年该业务毛利率 24%/24%。

3) 3C 自动化产线业务、铸造业务、货物贸易：近两年来公司聚焦主业光伏自动化产线+包装自动化产线，其他几项业务会保持小幅增长平稳发展，不作为重点战略布局。受疫情影响，3C 自动化产线业务、铸造业务、货物贸易在 2022 年出现一定的下滑，我们预测这些业务在 2023 年会有有一定的反弹，之后保持平稳。3C 自动化产线业务 2023/2024 收入增速 10%/5%，铸造产品业务 2023/2024 收入增速 15%/2%，货物贸易业务 2023/2024 收入增速 10%/5%，其他业务 2023/2024 收入增速 15%/2%。同时这些业务毛利率预期会维持稳定，3C 自动化产线业务 2023/2024 毛利率 15%/15%，铸造产品业务 2023/2024 毛利率 5%/5%，货物贸易业务 2023/2024 毛利率 6%/6%，其他业务 2023/2024 毛利率 30%/30%。

4) 钙钛矿：我们预测 2024 年行业钙钛矿产线招标量约 4GW（3-4 家头部玩家 1GW 招标+5-6 家追赶者 100MW 产线招标），预计单 GW 设备投资额约 **8 亿元**，对应 **32 亿元**市场。公司核心设备为磁控溅射 PVD 设备（以反式结构为例，钙钛矿电池 5 层薄膜中，HTL 层、金属电极层可能使用磁控溅射 PVD；而钙钛矿层、ETL 层、ETL 与金属电极之间的中间层则可能采用涂布或其他真空镀膜工艺如真空蒸镀、ALD、RPD）；同时公司也在真空蒸镀、ALD 设备上有所布局。综合考虑我们估算公司的市场份额约 **10%**（钙钛矿各公司的工艺、配方会有所差异，因此设备会有一定的定制化属性，同时钙钛矿多层薄膜使用的镀膜工艺也有所不同，综合考虑我们估算招标后公司的市占率约 10%，未来伴随着公司磁控溅射 PVD 外的真空镀膜产品逐渐成熟，公司市场份额有望提升）。按此估算 2024 年公司钙钛矿业务收入约 3.2 亿元。同时参考光伏行业镀膜设备毛利率，预测毛利率约 30%。

表11：京山轻机业务拆分与收入预测（百万元）

	2020A	2021A	2022E	2023E	2024E
收入	3,060	4,086	4,920	6,604	7,964
YoY	35%	34%	20%	34%	21%
光伏自动化产线	1,158	2,226	3,339	4,842	5,810
YoY	67%	92%	50%	45%	20%
毛利率	24.3%	22.6%	24.0%	24.0%	24.0%
包装自动化产线	739	939	845	930	976
YoY	6%	27%	-10%	10%	5%
毛利率	20.3%	19.9%	20.0%	20.0%	20.0%
3C 自动化产线	196	173	138	152	160
YoY	13%	-12%	-20%	10%	5%
毛利率	30.8%	13.0%	15.0%	15.0%	15.0%
铸造产品	372	384	307	353	360
YoY	0%	3%	-20%	15%	2%
毛利率	8.7%	5.1%	5.0%	5.0%	5.0%
货物贸易	397	160	128	141	148
YoY	103%	-60%	-20%	10%	5%
毛利率	5.6%	6.3%	6.0%	6.0%	6.0%
其他	198	203	162	187	190
YoY	46%	3%	-20%	15%	2%
毛利率	34.3%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%
钙钛矿					320
毛利率					30%

资料来源：京山轻机年报，民生证券研究院预测

投资建议：我们预计公司 2022-2024 年分别实现营业收入 49.20/66.04/79.64 亿元，同增 20.4%/34.2%/20.6%，归母净利润分别为 2.82/4.26/5.38 亿元，同增 93.2%/51.4%/26.2%，当前股价（4 月 6 日收盘价）对应 PE 分别为 51/34/27x，首次覆盖，给予“推荐”评级。

风险提示：光伏电池技术路线存在不确定性；组件设备需求不及预期；电池片设备研发进度不及预期；市场竞争加剧；产能扩张不及预期。

表12：京山轻机盈利预测与财务指标

项目/年度	2021A	2022E	2023E	2024E
营业收入（百万元）	4,086	4,920	6,604	7,964
增长率（%）	33.5	20.4	34.2	20.6
归属母公司股东净利润（百万元）	146	282	426	538
增长率（%）	171.0	93.2	51.4	26.2
每股收益（元）	0.23	0.45	0.68	0.86
PE	99	51	34	27
PB	4.9	4.5	4.0	3.5

资料来源：wind，民生证券研究院预测；（注：股价为 2023 年 4 月 6 日收盘价）；

7.2 捷佳伟创

公司是领先的光伏设备及绿色能源产业专用设备制造商，2007 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；公司系国内领先的晶体硅太阳能电池生产设备制造商，主营 PECVD 设备、扩散炉、制绒设备、刻蚀设备、清洗设备、自动化配套设备等太阳能电池片生产工艺流程中的主要设备的研发、制造和销售。

在钙钛矿领域，根据公司公众号公开信息，2022 年 7 月，首台套量产型钙钛矿电池核心装备-RPD 设备出货；2022 年 10 月，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，公司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，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。该蒸镀设备核心蒸发源由捷佳伟创研发团队自主研发，并通过创新性结构设计实现优良的多元共蒸效果。公司作为太阳能电池设备的领先企业，在 PERC、Topcon、HJT、IBC、钙钛矿等技术路线上进行了全面布局，并且推出了具有优势的差异化设备产品。

公司公众号公开信息表明，从 2022 年下半年至今，捷佳伟创依托全面强大的真空镀膜技术与多年沉淀的精密设备设计能力，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，订单金额超过 2 亿元人民币。公司在大尺寸钙钛矿、全钙钛矿叠层、HJT/TopCon 叠层钙钛矿领域的设备销售持续放量，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。公司在钙钛矿及钙钛矿叠层 MW 级量产型整线装备的研发和供应能力，获得了越来越多客户的关注与信任。未来公司的战略布局也将是 TOPCon、HJT、钙钛矿及钙钛矿叠层等光伏电池技术整线装备的深入布局，并不断创新引领着光伏电池装备技术的发展。

投资建议：我们预计公司 2022-2024 年分别实现营业收入 61.57/138.54/198.87 亿元，同增 22.0%/125.0%/43.5%，归母净利润分别为 10.19/22.47/33.70 亿元，同增 42.0%/120.6%/50.0%，当前股价（4 月 6 日收盘价）对应 PE 分别为 40/18/12x，维持“推荐”评级。

风险提示：TOPCon 技术迭代不及预期、公司业绩不及预期的风险等。

表13：捷佳伟创预测与财务指标

项目/年度	2021A	2022E	2023E	2024E
营业收入（百万元）	5,047	6,157	13,854	19,887
增长率（%）	24.8	22.0	125.0	43.5
归属母公司股东净利润（百万元）	717	1,019	2,247	3,370
增长率（%）	37.2	42.0	120.6	50.0
每股收益（元）	2.06	2.93	6.45	9.68
PE	57	40	18	12
PB	6.6	5.7	4.4	3.3

资料来源：wind，民生证券研究院预测；（注：股价为 2023 年 4 月 6 日收盘价）；

7.3 奥来德

公司是国内领先的 OLED 有机发光材料和蒸发源设备制造企业，主要从事 OLED 产业链上游环节中的有机发光材料的终端材料与蒸发源设备的研发、制造、销售及售后技术服务，其中有机发光材料为 OLED 面板制造的核心材料，蒸发源为 OLED 面板制造的关键设备蒸镀机的核心组件，经过近 15 年的行业技术经验积累，公司已向维信诺集团、和辉光电、TCL 华星集团、京东方、天马集团、信利集团等知名 OLED 面板生产企业提供有机发光材料，已向成都京东方、云谷(固安)、武汉华星、武汉天马提供蒸发源设备，并与合肥维信诺订立了蒸发源设备合同，其中成都京东方与云谷(固安)的蒸发源设备已完成验收，且产线已投产，运行状况良好。凭借稳定优质的产品质量，公司与上述客户建立了稳定的合作关系。

公司在钙钛矿领域主要通过募投方式布局两个新项目，分别为：1) 钙钛矿结构型太阳能电池蒸镀设备的开发项目；2) 低成本有机钙钛矿载流子传输材料和长寿命器件开发项目。

1) 项目 1：投资 2900 万元。目前钙钛矿光伏电池中的研发中多采用溶液旋涂法，该方法只适用于小面积电池片的制备，无法满足量产的需求。而采用线性蒸发源的蒸镀机能较好满足钙钛矿光伏电池的量产制备，可以提高钙钛矿光伏电池大面积制备的均匀性、批次稳定性、连续重复生产等能力。

2) 项目 2：投资 2000 万元。当前钙钛矿光伏电池所使用的空穴型载流子传输材料种类较少，成本较高，与钙钛矿相匹配的空穴型载流子传输材料的研究相对薄弱，性能要求及技术水平不能满足我国下游厂家应用需求。低成本、高迁移率的空穴型载流子材料可有效提高钙钛矿光伏电池的稳定性，提高钙钛矿光伏电池寿命，降低大面积制备钙钛矿光伏电池成本。

1) 蒸发源设备业务：公司设备业务主要是蒸发源和蒸镀机。首先，公司蒸发源设备完全打破了国外的技术壁垒，实现了技术领先，解决了国内 6 代 AMOLED 产线的“卡脖子”技术问题，同时提前布局 G8.5（G8.6）高世代蒸发源的技术开发和储备。目前公司 6 代线蒸发源还有三条线没确认收入，从签约到验收确认收入一般在一年到一年半左右，随着 6 代线的陆续交付和维修需求，同时 8.5 代线也有望落地。其次，公司根据市场需求以及公司在材料制造技术及蒸发源制造技术的大量储备基础上，进行小型蒸镀机的设计和制造布局，在小型蒸镀机的制造方面加大研发及产业化力度，2023 年也有望拿到钙钛矿领域相关蒸镀机订单。因此我们预计设备业务 2023/2024 年会迎来高速增长，对应的营收增速为 78%/53%。毛利率方面公司历史上设备毛利率在 69% 左右，未来随着高世代蒸发源及钙钛矿蒸镀机的持续落地，毛利率有望进一步提升，预测未来两年毛利率为 70%。

2) 有机发光材料：公司目前有两个材料生产基地，分别为长春奥来德工厂及上海奥来德工厂。长春奥来德工厂规划产能 5000 公斤，主要生产 OLED 有机发光材料、薄膜封装材料等；上海奥来德工厂规划产能 10000 公斤，主要生产 OLED 有机发光材料，目前进入到试生产阶段。目前，奥来德已向维信诺、和辉光电、TCL 华星、京东方、深天马、信利等知名 OLED 面板生产企业提供有机发光材料，未来随着上海工厂新材料产能的投放，收入有望迎来持续增长，因此我们预测公司有机发光材料 2023/2024 年对应的营收增速为 30%/30%。同时，公司最近 1~2 年会不断向面板厂商导入毛利率更高的新材料，因此材料的整体毛利也会不断提升，2023/2024 年该业务毛利率分 40%/40%。

表14：奥来德务拆分与收入预测（百万元）

	2020A	2021A	2022E	2023E	2024E
收入	284	406	458	724	1,051
YoY	-6%	43%	13%	58%	45%
蒸发源设备	189	262	258	460	704
YoY	9%	39%	-2%	78%	53%
毛利率	68%	69%	70%	70%	70%
有机发光材料	94	144	200	260	339
YoY	-26%	53%	38%	30%	30%
毛利率	30%	30%	35%	40%	40%

资料来源：奥来德年报，民生证券研究院测算

投资建议：我们预计公司 2022-2024 年分别实现营业收入 4.58/7.24/10.51 亿元，同增 12.8%/58.2%/45.1%，归母净利润分别为 1.19/2.03/3.01 亿元，同增 12.9%/71.6%/48.2%，当前股价（4 月 6 日收盘价）对应 PE 分别为 54/31/21，首次覆盖，给予“推荐”评级。

风险提示：OLED 材料放量不及预期、钙钛矿蒸镀设备研发推进不及预期、设备订单交付周期波动的风险等。

表15：奥来德预测与财务指标

项目/年度	2021A	2022E	2023E	2024E
营业收入（百万元）	406	458	724	1,051
增长率（%）	43.2	12.8	58.2	45.1
归属母公司股东净利润（百万元）	136	119	203	301
增长率（%）	89.2	-12.9	71.6	48.2
每股收益（元）	1.33	1.15	1.98	2.93
PE	47	54	31	21
PB	3.9	3.8	3.6	3.3

资料来源：wind，民生证券研究院预测；（注：股价为 2023 年 4 月 6 日收盘价）；

8 风险提示

- 1) **钙钛矿企业融资不如预期。**钙钛矿的技术突破需要下游钙钛矿电池企业与上游设备公司相互配合，早期仍需要一定的初始投资资金支持。相关企业融资不顺利可能会延缓钙钛矿相关技术的突破。
- 2) **钙钛矿大面积制备转换效率提升不如预期：**目前钙钛矿最需要解决的工艺难点在于大面积制备方面，如果无法突破，大面积钙钛矿电池的转换效率可能无法持续提升，延缓商业化进程。
- 3) **钙钛矿/晶硅叠层电池发展不及预期。**目前钙钛矿公司更多的仍聚焦在攻克单结钙钛矿电池的量产制备与相关研发，而与现有晶硅产业结合的钙钛矿/晶硅叠层电池多为技术储备状态，未来是否落地有不确定性。

京山轻机财务报表数据预测汇总

利润表 (百万元)	2021A	2022E	2023E	2024E
营业总收入	4,086	4,920	6,604	7,964
营业成本	3,284	3,857	5,151	6,171
营业税金及附加	20	26	35	42
销售费用	143	172	225	271
管理费用	211	256	337	406
研发费用	194	236	317	382
EBIT	181	353	524	662
财务费用	47	14	23	26
资产减值损失	-18	-23	-27	-37
投资收益	27	30	46	56
营业利润	153	349	523	660
营业外收支	-17	0	0	0
利润总额	135	349	523	660
所得税	17	43	64	81
净利润	119	306	458	579
归属于母公司净利润	146	282	426	538
EBITDA	284	485	698	868

资产负债表 (百万元)	2021A	2022E	2023E	2024E
货币资金	1,505	1,602	1,435	1,783
应收账款及票据	1,496	1,562	2,288	2,748
预付款项	333	393	525	629
存货	2,517	2,830	3,840	4,528
其他流动资产	282	431	521	594
流动资产合计	6,134	6,819	8,609	10,283
长期股权投资	168	197	243	299
固定资产	349	433	473	516
无形资产	196	202	211	212
非流动资产合计	1,706	2,077	2,246	2,365
资产合计	7,840	8,896	10,855	12,648
短期借款	196	196	196	196
应付账款及票据	2,492	2,779	3,712	4,446
其他流动负债	1,987	2,199	2,768	3,235
流动负债合计	4,674	5,173	6,675	7,877
长期借款	121	401	401	401
其他长期负债	57	52	50	63
非流动负债合计	178	453	451	464
负债合计	4,852	5,626	7,127	8,341
股本	623	623	623	623
少数股东权益	41	65	97	138
股东权益合计	2,988	3,270	3,729	4,307
负债和股东权益合计	7,840	8,896	10,855	12,648

资料来源：公司公告、民生证券研究院预测

主要财务指标	2021A	2022E	2023E	2024E
成长能力 (%)				
营业收入增长率	33.52	20.42	34.23	20.60
EBIT 增长率	87.92	94.77	48.19	26.41
净利润增长率	171.04	93.15	51.38	26.18
盈利能力 (%)				
毛利率	19.63	21.60	22.00	22.52
净利率	3.57	5.73	6.46	6.76
总资产收益率 ROA	1.86	3.17	3.93	4.25
净资产收益率 ROE	4.95	8.79	11.74	12.90
偿债能力				
流动比率	1.31	1.32	1.29	1.31
速动比率	0.70	0.67	0.62	0.64
现金比率	0.32	0.31	0.21	0.23
资产负债率 (%)	61.89	63.24	65.65	65.95
经营效率				
应收账款周转天数	100.67	98.00	101.00	101.00
存货周转天数	279.79	270.00	274.00	270.00
总资产周转率	0.58	0.59	0.67	0.68
每股指标 (元)				
每股收益	0.23	0.45	0.68	0.86
每股净资产	4.73	5.15	5.83	6.69
每股经营现金流	1.03	0.77	0.31	1.03
每股股利	0.00	0.00	0.00	0.00
估值分析				
PE	99	51	34	27
PB	4.9	4.5	4.0	3.5
EV/EBITDA	47.41	27.85	19.57	15.33
股息收益率 (%)	0.00	0.00	0.00	0.00

现金流量表 (百万元)	2021A	2022E	2023E	2024E
净利润	119	306	458	579
折旧和摊销	103	132	174	207
营运资金变动	305	-45	-544	-271
经营活动现金流	642	480	191	644
资本开支	-136	-455	-275	-244
投资	-38	0	0	0
投资活动现金流	-159	-455	-275	-244
股权募资	533	-23	0	0
债务募资	-127	145	-21	0
筹资活动现金流	358	72	-83	-51
现金净流量	831	97	-167	348

捷佳伟创财务报表数据预测汇总

利润表 (百万元)	2021A	2022E	2023E	2024E
营业总收入	5,047	6,157	13,854	19,887
营业成本	3,806	4,535	10,260	14,551
营业税金及附加	21	25	55	80
销售费用	71	99	222	318
管理费用	102	135	304	436
研发费用	238	283	637	915
EBIT	819	1,159	2,564	3,891
财务费用	-7	-47	-51	-67
资产减值损失	-64	-66	-102	-185
投资收益	-13	25	55	80
营业利润	817	1,166	2,571	3,855
营业外收支	-1	0	0	0
利润总额	816	1,166	2,571	3,855
所得税	103	146	321	481
净利润	714	1,020	2,250	3,374
归属于母公司净利润	717	1,019	2,247	3,370
EBITDA	862	1,211	2,632	3,975

资产负债表 (百万元)	2021A	2022E	2023E	2024E
货币资金	3,991	4,348	5,668	7,051
应收账款及票据	2,797	3,366	7,851	11,303
预付款项	109	159	361	512
存货	4,033	5,438	11,198	16,599
其他流动资产	723	965	1,799	2,505
流动资产合计	11,652	14,276	26,876	37,970
长期股权投资	77	101	157	236
固定资产	330	360	374	383
无形资产	155	163	166	171
非流动资产合计	1,131	1,635	1,817	1,920
资产合计	12,783	15,912	28,694	39,890
短期借款	13	13	13	13
应付账款及票据	2,250	2,857	6,462	9,166
其他流动负债	4,275	5,835	12,849	18,162
流动负债合计	6,538	8,705	19,325	27,341
长期借款	0	0	0	0
其他长期负债	41	47	49	51
非流动负债合计	41	47	49	51
负债合计	6,579	8,752	19,373	27,392
股本	348	348	348	348
少数股东权益	1	2	4	8
股东权益合计	6,204	7,160	9,320	12,498
负债和股东权益合计	12,783	15,912	28,694	39,890

资料来源：公司公告、民生证券研究院预测

主要财务指标	2021A	2022E	2023E	2024E
成长能力 (%)				
营业收入增长率	24.80	21.99	125.01	43.55
EBIT 增长率	19.84	41.47	121.21	51.75
净利润增长率	37.16	42.04	120.55	49.97
盈利能力 (%)				
毛利率	24.60	26.35	25.94	26.83
净利率	14.21	16.55	16.22	16.95
总资产收益率 ROA	5.61	6.40	7.83	8.45
净资产收益率 ROE	11.57	14.24	24.13	26.99
偿债能力				
流动比率	1.78	1.64	1.39	1.39
速动比率	1.06	0.93	0.74	0.71
现金比率	0.61	0.50	0.29	0.26
资产负债率 (%)	51.47	55.00	67.52	68.67
经营效率				
应收账款周转天数	95.73	103.10	103.10	103.10
存货周转天数	386.79	443.00	402.00	421.00
总资产周转率	0.46	0.43	0.62	0.58
每股指标 (元)				
每股收益	2.06	2.93	6.45	9.68
每股净资产	17.81	20.55	26.75	35.87
每股经营现金流	3.88	2.68	4.42	4.83
每股股利	0.18	0.26	0.56	0.85
估值分析				
PE	57	40	18	12
PB	6.6	5.7	4.4	3.3
EV/EBITDA	43.12	30.37	13.48	8.58
股息收益率 (%)	0.15	0.22	0.48	0.72

现金流量表 (百万元)	2021A	2022E	2023E	2024E
净利润	714	1,020	2,250	3,374
折旧和摊销	42	52	68	84
营运资金变动	451	-263	-1,024	-2,131
经营活动现金流	1,349	934	1,539	1,684
资本开支	-239	-299	-189	-101
投资	-348	-245	0	0
投资活动现金流	-571	-517	-122	-101
股权募资	2,521	-1	0	0
债务募资	-180	3	-5	0
筹资活动现金流	2,241	-61	-98	-199
现金净流量	3,008	357	1,320	1,383

奥来德财务报表数据预测汇总

利润表 (百万元)	2021A	2022E	2023E	2024E
营业总收入	406	458	724	1,051
营业成本	181	210	306	433
营业税金及附加	5	5	7	11
销售费用	10	12	19	28
管理费用	64	65	103	150
研发费用	71	77	122	177
EBIT	105	118	212	319
财务费用	-11	-9	-4	-3
资产减值损失	-3	-4	-6	-9
投资收益	5	3	4	6
营业利润	135	128	220	326
营业外收支	12	0	0	0
利润总额	147	128	220	326
所得税	11	10	17	25
净利润	136	119	203	301
归属于母公司净利润	136	119	203	301
EBITDA	138	184	331	489

资产负债表 (百万元)	2021A	2022E	2023E	2024E
货币资金	780	404	292	268
应收账款及票据	98	99	156	227
预付款项	16	16	23	33
存货	213	275	400	566
其他流动资产	238	223	235	250
流动资产合计	1,344	1,017	1,107	1,344
长期股权投资	0	66	102	119
固定资产	230	460	588	702
无形资产	75	78	81	84
非流动资产合计	844	1,216	1,406	1,550
资产合计	2,189	2,233	2,514	2,895
短期借款	0	0	0	0
应付账款及票据	84	75	110	156
其他流动负债	269	323	462	658
流动负债合计	353	398	571	813
长期借款	11	11	11	11
其他长期负债	169	160	159	161
非流动负债合计	180	171	170	172
负债合计	533	568	742	985
股本	73	103	103	103
少数股东权益	0	0	0	0
股东权益合计	1,656	1,664	1,772	1,909
负债和股东权益合计	2,189	2,233	2,514	2,895

资料来源：公司公告、民生证券研究院预测

主要财务指标	2021A	2022E	2023E	2024E
成长能力 (%)				
营业收入增长率	43.17	12.82	58.17	45.06
EBIT 增长率	53.55	11.75	80.16	50.32
净利润增长率	89.19	-12.91	71.57	48.17
盈利能力 (%)				
毛利率	55.46	54.17	57.79	58.77
净利率	33.52	25.87	28.07	28.67
总资产收益率 ROA	6.22	5.31	8.09	10.41
净资产收益率 ROE	8.22	7.12	11.47	15.78
偿债能力				
流动比率	3.81	2.56	1.94	1.65
速动比率	3.10	1.80	1.18	0.90
现金比率	2.21	1.02	0.51	0.33
资产负债率 (%)	24.36	25.46	29.50	34.04
经营效率				
应收账款周转天数	88.12	80.50	80.50	80.50
存货周转天数	430.01	484.80	484.80	484.80
总资产周转率	0.19	0.21	0.31	0.39
每股指标 (元)				
每股收益	1.33	1.15	1.98	2.93
每股净资产	16.13	16.21	17.26	18.60
每股经营现金流	1.37	1.62	2.88	4.27
每股股利	1.50	0.93	1.60	2.37
估值分析				
PE	47	54	31	21
PB	3.9	3.8	3.6	3.3
EV/EBITDA	40.74	32.63	18.44	12.53
股息收益率 (%)	2.41	1.50	2.57	3.81

现金流量表 (百万元)	2021A	2022E	2023E	2024E
净利润	136	119	203	301
折旧和摊销	33	66	118	170
营运资金变动	-6	-8	-26	-33
经营活动现金流	141	167	296	439
资本开支	-251	-330	-266	-287
投资	641	-63	-32	-11
投资活动现金流	412	-420	-298	-298
股权募资	0	0	0	0
债务募资	0	-1	-12	0
筹资活动现金流	-76	-122	-110	-165
现金净流量	477	-375	-112	-24

插图目录

图 1: 钙钛矿正八面体晶体结构图	4
图 2: 钙钛矿电池带隙调节	5
图 3: 不同带隙对应光伏电池的转换效率	5
图 4: 钙钛矿电池和晶硅电池生产成本比较	5
图 5: 涂布工艺流程简化示意图: 放卷-涂布-烘干-收卷	7
图 6: 狭缝涂布法涂布环节示意图	8
图 7: 中间导向框架式纠偏应用示意图	8
图 8: 蒸汽加热示意图	9
图 9: 典型狭缝涂布设备	10
图 10: 杜邦公司涂液工艺制 OLED 彩色显示器流程	11
图 11: 圆柱形锂离子电池结构图	11
图 12: 2020-2025 年中国及全球锂电池涂布设备市场规模预测趋势图 (亿元)	13
图 13: 蒸发镀膜设备示意图	17
图 14: 2017-2022 年中国真空镀膜设备市场规模预测趋势图	19
图 15: 钙钛矿层薄膜制备方法概览	20
图 16: 一步溶液法制备有机无机杂化钙钛矿薄膜的过程图	21
图 17: 分部浸渍法示意图	21
图 18: 两步旋涂法示意图	21
图 19: 双源共蒸法示意图	22
图 20: 单源蒸发法示意图	22
图 21: 分步气相沉积法示意图	23
图 22: 气相辅助溶液法的制备有机无机杂化钙钛矿薄膜的过程图	23
图 23: 2014-2022 年钙钛矿电池厂商薄膜制备相关专利统计图 (个)	24
图 24: 2014-2022 年薄膜制备工艺相关专利时间分布统计图 (个)	24
图 25: 不同类型太阳能电池的光电转换效率和器件面积关系 (PSC 为钙钛矿电池)	26
图 26: 溶液法中钙钛矿晶体生长示意图 (左: 钙钛矿前驱体溶液; 中: 钙钛矿前驱体与溶剂/添加剂配位形成的中间相; 右: 退火后形成钙钛矿晶体)	27
图 27: 风刀涂布示意图	28
图 28: 两种典型太阳能电池晶硅绒面 (左图: 单晶硅; 右图: 多晶硅)	30
图 29: 绒面硅片上直接使用溶液法处理时成膜的不均匀现象	30
图 30: 在线镀膜工艺示意图	31
图 31: 离线镀膜生产线简图	31
图 32: PSC 缓冲层结构示意图	33
图 33: 整线生产涉及工艺	33
图 34: Topcon 电池结构示意图	34
图 35: HJT 电池结构示意图	35
图 36: IBC 电池结构示意图	35
图 37: 钙钛矿正八面体晶体结构图	36
图 38: nip 结构 (正式结构)	36
图 39: pin 结构 (反式结构)	36
图 40: 电池转换效率历程 (圈内为钙钛矿/晶硅叠层)	37
图 41: 两端叠层电池结构	38
图 42: 四端叠层结构	38
图 43: 4t 钙钛矿/Topcon 叠层	39
图 44: 钙钛矿/HJT 叠层	39
图 45: 四端式钙钛矿硅叠层电池结构图	40
图 46: 两端式钙钛矿硅叠层电池结构图	40
图 47: 三端式钙钛矿硅叠层电池示意图	41
图 48: 学术界三端式叠层电池的各类结构示意图	42
图 49: 绒面硅片上直接使用溶液法处理时成膜的不均匀现象	43
图 50: 两端式钙钛矿/硅叠层电池中常用的陷光策略示意图	43
图 51: 截至 2023 年 2 月钙钛矿电池厂商叠层电池专利 (个)	44

图 52: 截至 2023 年 2 月各叠层电池专利数占比 (%)	44
图 53: 学术界 2T/4T 结构叠层电池转换效率表	46
图 54: 钙钛矿电池成本拆分 (协鑫光电估算 100MW 标准线数据)	47
图 55: 光刻胶产业链	48
图 56: 光刻过程	49
图 57: OLED 工艺流程	50
图 58: OLED 发光原理示意图	50
图 59: OLED 发光原理示意图	50
图 60: OLED 蒸镀概念图	51
图 61: 锂电池工艺流程图	52
图 62: 2019 年瓦楞纸包装设备 TOP5 公司市场份额	54
图 63: 2014-2024E 瓦楞纸包装市场规模 (亿平方米)	54
图 64: 2010-2023E 全国光伏组件产量 (GW)	54
图 65: 2019-2023E 全球光伏装机量 (GW)	54

表格目录

表 1: 溶液涂布主要方法示意图	7
表 2: 涂布设备主要供应商	12
表 3: 真空镀膜技术对比	14
表 4: 蒸镀设备相关应用领域	17
表 5: 国内外部分真空镀膜设备厂商	18
表 6: 钙钛矿电池公司近期动态	24
表 7: 钙钛矿电池设备供应商近期动态	25
表 8: 钙钛矿结晶中的 VCD 工艺简介	28
表 9: 涂布与蒸镀技术对比	31
表 10: 钙钛矿电池公司近期动态	45
表 11: 京山轻机业务拆分与收入预测 (百万元)	56
表 12: 京山轻机盈利预测与财务指标	56
表 13: 捷佳伟创预测与财务指标	58
表 14: 奥来德业务拆分与收入预测 (百万元)	59
表 15: 奥来德预测与财务指标	60
京山轻机财务报表数据预测汇总	62
捷佳伟创财务报表数据预测汇总	63
奥来德财务报表数据预测汇总	64

分析师承诺

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登记为注册分析师，基于认真审慎的工作态度、专业严谨的研究方法与分析逻辑得出研究结论，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。本报告清晰准确地反映了研究人员的研究观点，结论不受任何第三方的授意、影响，研究人员不曾因、不因、也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

评级说明

投资建议评级标准		评级	说明
以报告发布日后的 12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	公司评级	推荐	相对基准指数涨幅 15%以上
		谨慎推荐	相对基准指数涨幅 5% ~ 15%之间
		中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上
	行业评级	推荐	相对基准指数涨幅 5%以上
		中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上

免责声明

民生证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。

本报告仅供本公司境内客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告仅为参考之用，并不构成对客户的投资建议，不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，客户应当充分考虑自身特定状况，不应单纯依靠本报告所载的内容而取代个人的独立判断。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容而导致的任何可能的损失负任何责任。

本报告是基于已公开信息撰写，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期，本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告，但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问、咨询服务等相关服务，本公司的员工可能担任本报告所提及的公司的董事。客户应充分考虑可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一参考依据。

若本公司以外的金融机构发送本报告，则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。本报告不构成本公司向发送本报告金融机构之客户提供的投资建议。本公司不会因任何机构或个人从其他机构获得本报告而将其视为本公司客户。

本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构或个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、转载、发表、篡改或引用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为本公司的商标、服务标识及标记。本公司版权所有并保留一切权利。

民生证券研究院：

上海：上海市浦东新区浦明路 8 号财富金融广场 1 幢 5F； 200120

北京：北京市东城区建国门内大街 28 号民生金融中心 A 座 18 层； 100005

深圳：广东省深圳市福田区益田路 6001 号太平金融大厦 32 层 05 单元； 518026