

- ▶ **本周关注：安徽合力、巨星科技、诺力股份、郑煤机**
- ▶ **本周核心观点：本周国内社融数据与美国部分经济数据超预期，关注出口链与国内基建相关产业链，长期关注新技术**
- ▶ **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。**
- ▶ **相较 TOPCON，HJT 更适合与钙钛矿叠层。** 1) 钙钛矿电池与异质结电池进行叠层，HJT 电池表面本身就是 TCO，HJT 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；2) 叠层电池中 HJT 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会消失，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；3) 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
- ▶ **产业中钙钛矿/晶硅叠层关注度有所升温。**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。
- ▶ **钙钛矿/硅叠层电池常见的配置有二端叠层（2T）与四端叠层（4T），2T/4T 技术路线当前没有明显结论。**4T 结构主要是指单结的钙钛矿电池和晶硅电池分别独立制作然后串联，2T 结构主要是指在晶硅电池表面直接制作钙钛矿电池。1) 从转换效率上看，**目前钙钛矿/晶硅叠层电池 2T/4T 结构的转换效率没有明显差异，但优于钙钛矿/钙钛矿叠层电池、钙钛矿/碲化镉叠层电池；**2) 从制备成本看，2T 叠层电池在硅电池上直接沉积钙钛矿电池制成，与机械堆叠的 4T 电池相比，只需要一个透明电极，更少的电极材料和更少的沉积步骤，**2T 电池的制造成本更低；**3) 从制备难度上看，**4T 电池分别制备两个电池再串联比较简单，**而 2T 电池需要考虑顶底电池电流匹配问题，技术相对复杂，电流匹配的限制使得设计 2T 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；4) 从兼容性角度看，由于 4T 电池相当于有两个正极和负极，与现有电站匹配存在问题，但未来也有望通过组件内部串联的方式，将 4T 组件优化为 2T 组件解决。
- ▶ **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。建议关注各环节设备布局最全面的：**京山轻机、捷佳伟创**
- ▶ **风险提示：**1) 钙钛矿产业融资进展与转换效率提升不及预期；2) 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

- 一周解一惑系列：换电行业及产业链梳理 2023/02/12
- 一周解一惑系列：钙钛矿技术细节及产业分析-2023/02/05
- 一周解一惑系列：人口压力&产业升级，机器人产业快速发展-2023/01/29
- 一周解一惑系列：钙钛矿层薄膜制备中涂布、蒸镀设备的对比选择-2023/01/15
- 一周解一惑系列：退役动力电池回收放量时点将至-2023/01/08

目录

1 晶硅叠层钙钛矿电池以及研发背景	3
1.1 当前晶硅电池	3
1.2 钙钛矿晶硅叠层电池	4
2 学术界进度汇总	10
2.1 钙钛矿/硅叠层太阳能电池的多种配置方式	10
2.2 钙钛矿/硅叠层太阳能电池的电池效率提升	12
3 产业进度汇总	15
3.1 钙钛矿电池厂商专利布局	15
3.2 钙钛矿叠层电池产业化难点	16
4 投资建议	18
4.1 京山轻机	18
4.2 捷佳伟创	18
5 风险提示	19
插图目录	20
表格目录	20

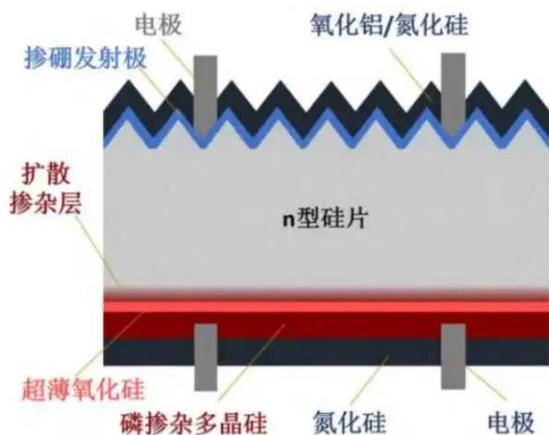
1 晶硅叠层钙钛矿电池以及研发背景

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。

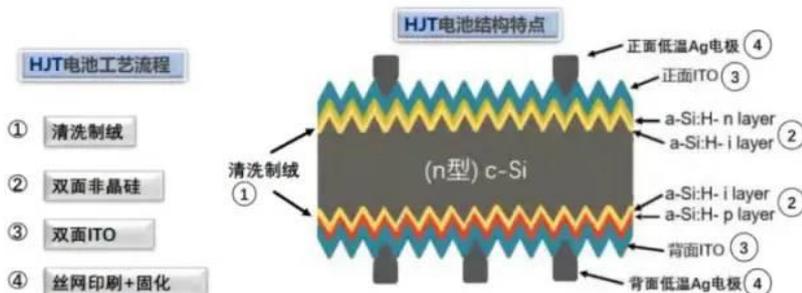
图1: Topcon 电池结构示意图



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。

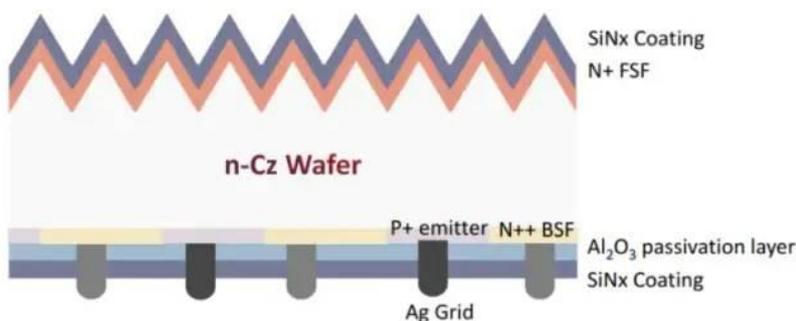
图2: HJT 电池结构示意图



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3: IBC 电池结构示意图

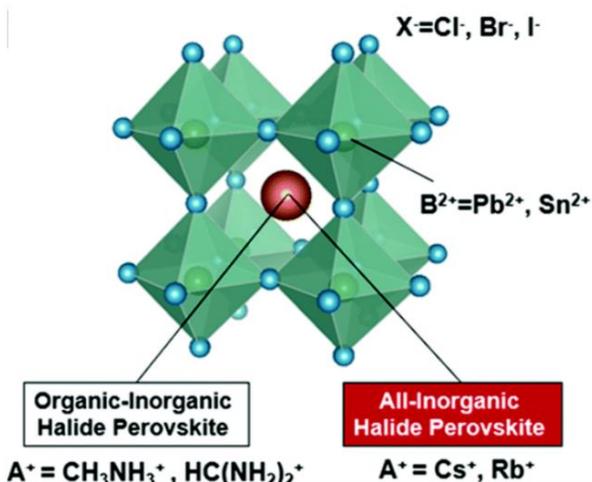


资料来源: 电力电子研究院《一文读懂当前晶硅电池 (PERC、Topcon、HJT、N-IBC、P-IBC) 技术及工艺流程》, 民生证券研究院

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 CaTiO₃, 广义的钙钛矿泛指与 CaTiO₃ 结构类似的 ABX₃ 型化合物, A 代表有机分子 (一般为 CH₃NH₃ 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4：钙钛矿正八面体晶体结构图

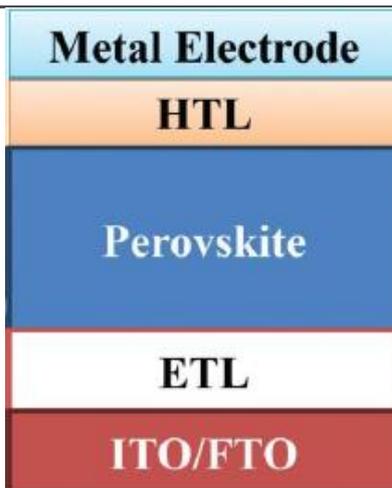


资料来源：澎湃《能创无限 | ABX₃钙钛矿？没钙无钛不是矿！》，民生证券研究院

1.2.1 纯钙钛矿电池结构

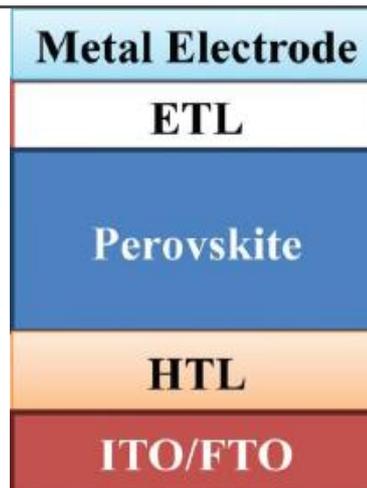
目前钙钛矿电池分为单结钙钛矿与叠层钙钛矿（多结）两类。纯钙钛矿电池可分为 n-i-p 和 p-i-n 两种器件结构，其中 n-i-p 结构是指电子传输层-钙钛矿层-空穴传输层的器件结构，p-i-n 结构是指空穴传输层-钙钛矿层-电子传输层的器件结构，其中 n-i-p 器件结构较为常见。但由于 p-i-n 结构制备工艺简单，成本低，可用于钙钛矿-钙钛矿叠层器件的制备，因此越来越受到科研者们的关注。

图5：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6：pin 结构（反式结构）



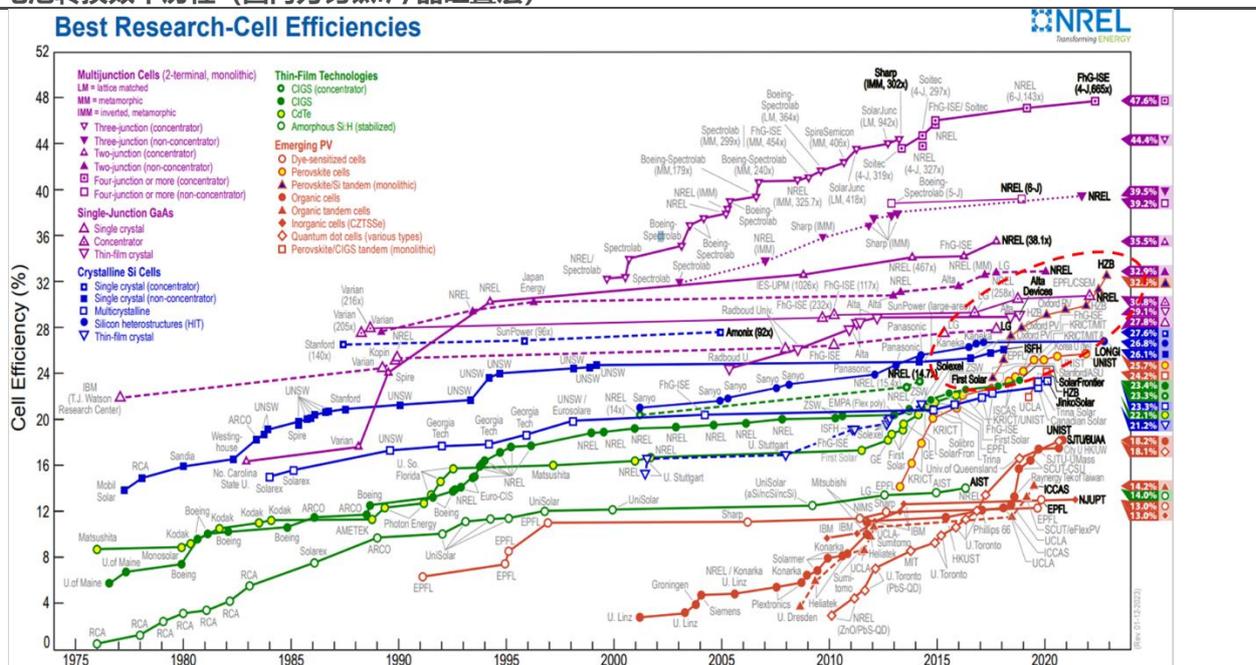
资料来源：知研光电材料，民生证券研究院

1.2.2 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。

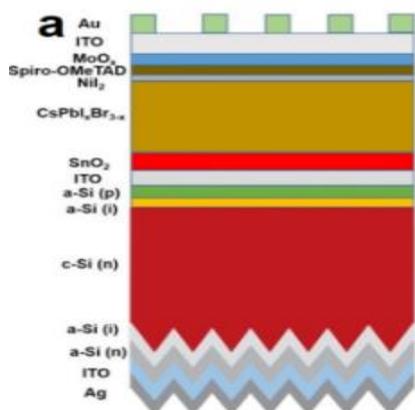
图7：电池转换效率历程（圈内为钙钛矿/晶硅叠层）



资料来源：NREL，民生证券研究院

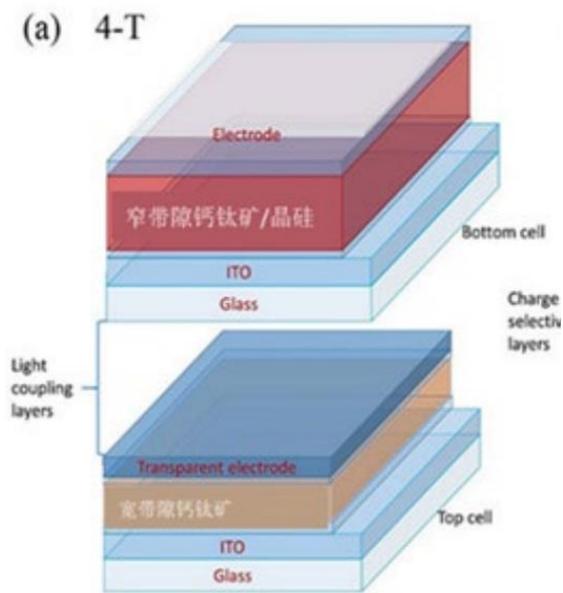
钙钛矿/硅叠层太阳能电池有多种配置方式，常见的配置方法有二端叠层（2T）与四端叠层（4T）。

图8：两端叠层电池结构



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

图9：四端叠层结构



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

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。

1.2.3 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10：4t 钙钛矿/Topcon 叠层

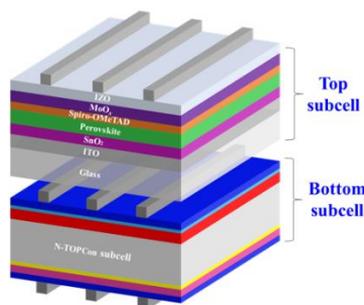
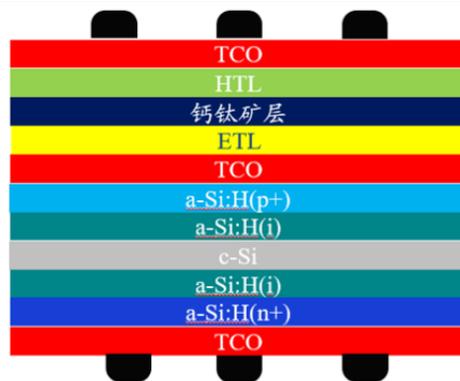


图11：钙钛矿/HJT 叠层



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

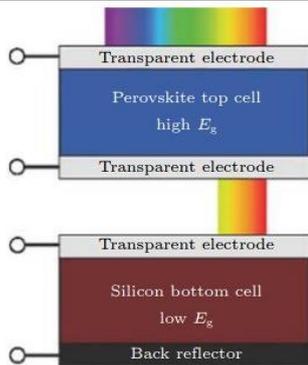
顶顺序而组成。叠层电池上面是钙钛矿电池，下面是异质结电池，钙钛矿吸收中短波长的光，中长波的光透过钙钛矿由异质结吸收，通过光学和叠层的设计来输出超高电压。在转化率贡献上，异质结可以贡献 25%-26%的转化率，而钙钛矿叠层则是增加其 3%-5%增量效益。值得注意的是，由于钙钛矿电池与硅异质结电池均为 P-N 结构，如果将二者直接串联，接触界面会形成反 PN 结，导致电压相互抵消而不导电，需要增加过渡层，隧穿结或过渡层也是 P-N 结构，过渡层需要同时满足可导电、透光性好、有一定厚度几个条件，来联接两个子电池。

2 学术界进度汇总

2.1 钙钛矿/硅叠层太阳能电池的多种配置方式

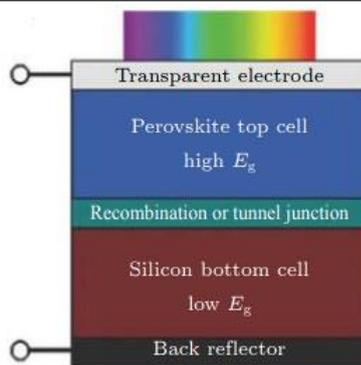
钙钛矿/硅叠层太阳能电池有多种配置方式，常见的配置方法有二端叠层（2T）与四端叠层（4T）。

图12：四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13：两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。**

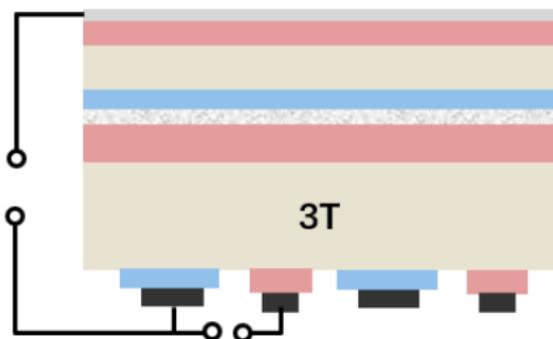
但两端叠层电池也有一些限制：由于两个子电池串联连接，子电池必须被设计为在工作时有相似的光电流，因为串联的子电池电流受电流较低的子电池限制。电流匹配要求会将顶电池理想带隙限制在 1.7~1.8 eV 的狭窄范围内，为制备高效率叠层电池带来较大的难度。电流匹配的限制使得设计两端叠层电池时需要针对不同地理位置的光谱条件做出细微调整，才能获得最大的功率输出。同时由于直接在硅电池顶部沉积钙钛矿电池，硅电池顶部陷光结构的制作和表面钝化设计将会更加困难。因为不规则的表面不利于沉积规则的钙钛矿薄膜，沉积工艺也可能破坏硅的上表面钝化层。

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 Mailoa 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。

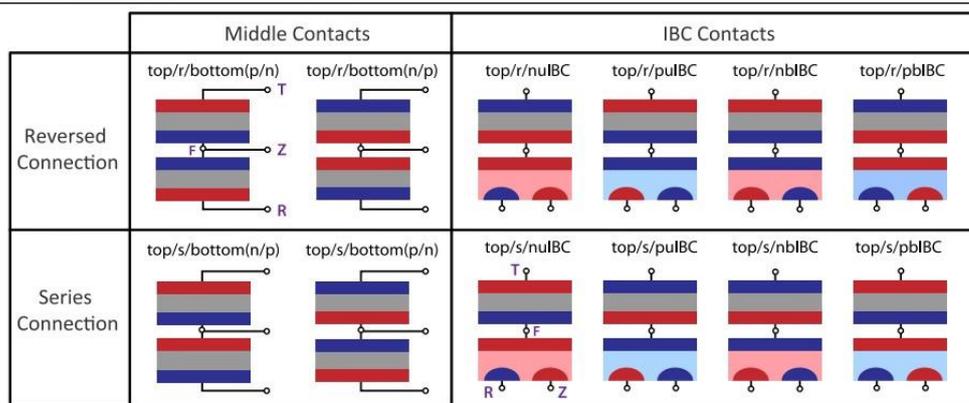
为了克服 2T 和 4T 结构的弊端，近年来，三端结构 (3T) 作为一种全新的设计思路逐渐进入了研究者的视野。2017 年 Werner 课题组提出了将叉指式背接触硅 (IBC) 电池与宽带隙顶部电池相结合制造的三端结构叠层电池，并通过二维器件物理模型研究了三端配置下叠层电池的运行。3T 结构能减少 2T 和 4T 本身的缺陷。但是，3T 结构通常需要交叉指式背接触技术 (IBC)，需要高质量的材料 (例如具有较长扩散长度的 n 型材料)，暂时难以大量生产的低成本的电池。

图14：三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15：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

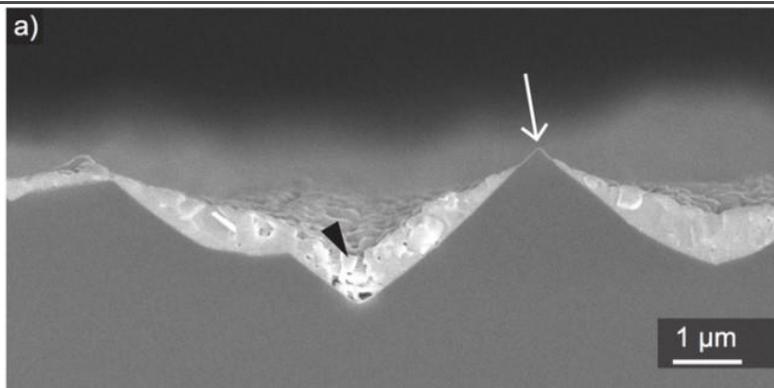
2.2 钙钛矿/硅叠层太阳能电池的电池效率提升

根据《材料导报》发布的中国科学院宁波材料工程研究所、浙江大学、宁波大学的研究成果《钙钛矿晶硅叠层太阳电池关键材料与技术研究进展》所述，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 $J_{SC} = 18.1\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $\text{PCE} = 23.6\%$ 。目前，高效叠层电池基本采用 p-i-n 结构的钙钛矿顶电池。

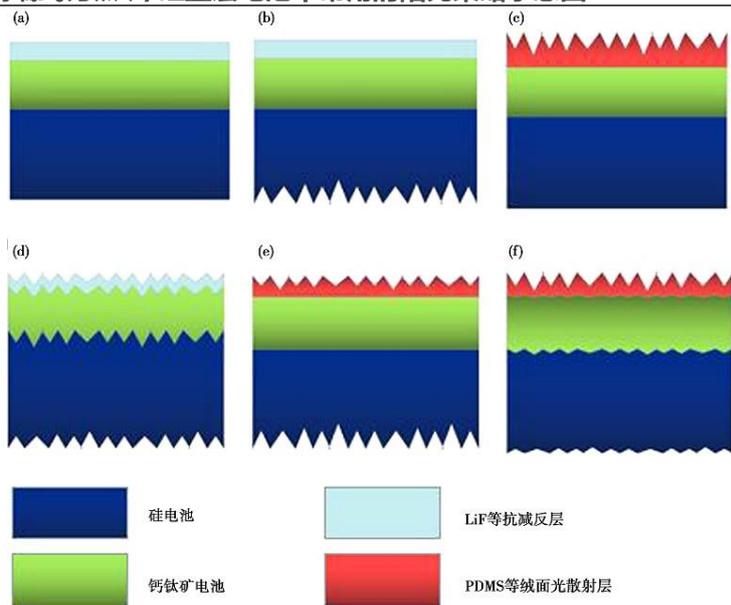
减少反射损耗的途径通常有两种：一是在器件前表面设计一层减反层增加前表面的抗反射能力，进而减少逸出器件的光；二是使用绒面结构，使进入器件的光吸收最大化。2018 年，瑞士 EPFL 的 Ballif 课题组通过物理沉积+溶液涂层的组合，先用共蒸法将碘化铅框架镀到金字塔结构上，在用溶液法涂覆有机卤化物，沉积出高质量薄膜，避免只用溶液法时溶液受重力影响聚集在金字塔谷底，导致成膜不均匀的问题。

图16: 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17: 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 $1\mu\text{m}$ ，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。

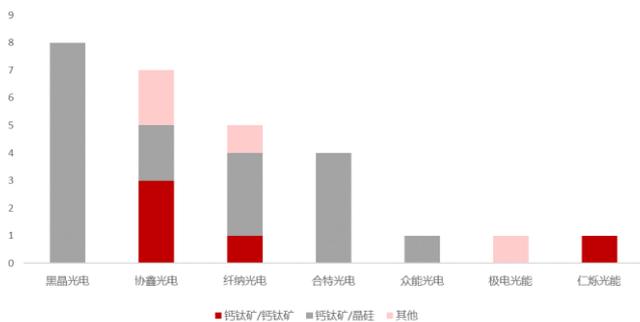
除了叠层电池的高效化研究外，开展高效叠层电池的大面积均匀制备工艺以及稳定性研究也至关重要。目前，透明电极的磁控溅射或热蒸发技术，以及钙钛矿及载流子传输层的狭缝式涂布技术，都有望实现大面积均匀制备。在 $156\text{ cm} \times 156\text{ cm}$ 的大面积晶硅电池上叠加钙钛矿组件，是大面积叠层电池切实可行的制备方法。另外，钙钛矿电池还面临稳定性的挑战，其容易受到光、热、水、氧等影响，特别是宽带隙钙钛矿电池的相不稳定性尤为突出。因此，需要通过钙钛矿层及载流子传输层特性，以及有机无机界面特性的调控，抑制碘离子的迁移，提高宽带隙钙钛矿电池的稳定性，从而达到可与晶硅底电池匹配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

3 产业进度汇总

3.1 钙钛矿电池厂商专利布局

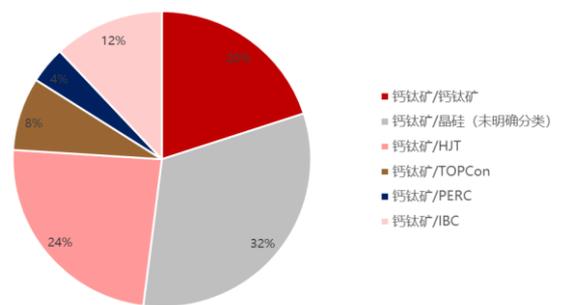
从叠层电池种类来看，目前钙钛矿/晶硅叠层电池的专利数更多，许多钙钛矿电池厂商持有相关专利，如黑晶光电、协鑫光电、纤纳光电、合特光电、众能光电等。全钙钛矿叠层电池的专利数并不多，目前仅有协鑫光电、纤纳光电和仁烁光能持有全钙钛矿叠层电池专利。从叠层电池专利占比来看，钙钛矿/晶硅叠层占比较大，其中，钙钛矿/HJT 叠层电池的专利数较多，其次是钙钛矿/钙钛矿叠层电池。从专利整体布局来看，目前产业端对于全钙钛矿叠层电池和钙钛矿/HJT 叠层电池的关注度更高。

图18: 截至 2023/02/16 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19: 截至 2023/02/16 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*40c m²，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1: 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的市场竞争力。
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、索比光伏网、东吴光伏圈微信公众号，民生证券研究院

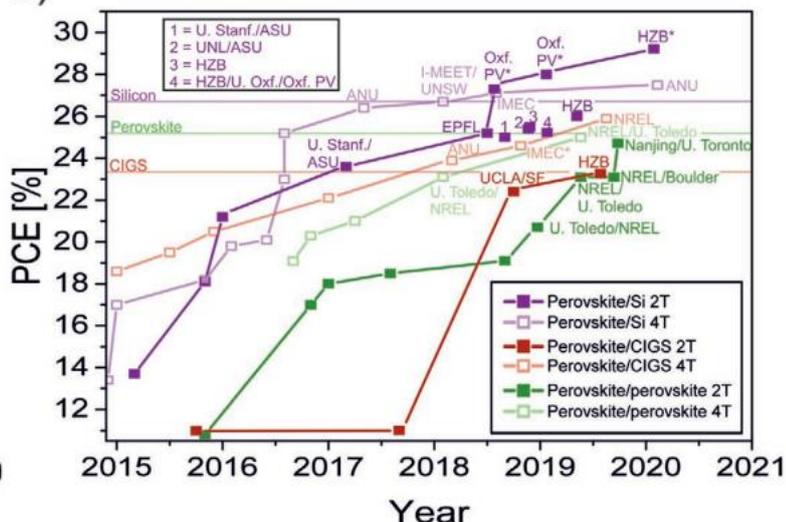
3.2 钙钛矿叠层电池产业化难点

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20：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。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）。

4 投资建议

4.1 京山轻机

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。

4.2 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 年与深圳市捷佳伟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。

5 风险提示

- 1) **钙钛矿产业融资进展与转换效率提升不及预期。**目前钙钛矿电池公司多集中在创业公司，需要持续融资推动产线落地与研发。同时目前钙钛矿产业核心待突破点为转换效率的提升。
- 2) **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。

插图目录

图 1: Topcon 电池结构示意图	3
图 2: HJT 电池结构示意图	4
图 3: IBC 电池结构示意图	4
图 4: 钙钛矿正八面体晶体结构图	5
图 5: nip 结构 (正式结构)	5
图 6: pin 结构 (反式结构)	5
图 7: 电池转换效率历程 (圈内为钙钛矿/晶硅叠层)	6
图 8: 两端叠层电池结构	7
图 9: 四端叠层结构	7
图 10: 4t 钙钛矿/Topcon 叠层	8
图 11: 钙钛矿/HJT 叠层	8
图 12: 四端式钙钛矿硅叠层电池结构图	10
图 13: 两端式钙钛矿硅叠层电池结构图	10
图 14: 三端式钙钛矿硅叠层电池示意图	11
图 15: 学术界三端式叠层电池的各类结构示意图	12
图 16: 绒面硅片上直接使用溶液法处理时成膜的不均匀现象	13
图 17: 两端式钙钛矿/硅叠层电池中常用的陷光策略示意图	13
图 18: 截至 2023/02/16 钙钛矿电池厂商叠层电池专利 (个)	15
图 19: 截至 2023/02/16 各叠层电池专利数占比 (%)	15
图 20: 学术界 2T/4T 结构叠层电池转换效率表	17

表格目录

表 1: 钙钛矿电池公司近期动态	16
------------------------	----

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。	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
	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