

2023 年 01 月 08 日

看好

相关研究

证券分析师

朱栋 A0230522050001
zhudong@swsresearch.com

研究支持

李冲 A0230122060005
lichong@swsresearch.com

联系人

李冲
(8621)23297818×
lichong@swsresearch.com

钙钛矿东风渐起，降本增效未来可期

——“新技术”系列之二：钙钛矿电池技术

本期投资提示：

- **钙钛矿光伏横空出世，效率屡创新高。**钙钛矿是以俄罗斯矿物学家 Perovski 的名字命名的最初单指钛酸钙 (CaTiO_3) 这种矿物，后来把结构为 ABX_3 以及与之类似的晶体统称为钙钛矿物质。随后钙钛矿材料优异的性质被充分研究挖掘，电池效率也快速攀升至 25.7%，在短短十余年内几乎追赶上晶硅光伏电池过去四十余年的最佳效率 26.7%，使其具备了未来挑战晶硅光伏电池主导地位的实力。
- **多种技术路线涌现，对硅基光伏是机遇也是挑战。**由于晶硅具有窄带隙的特点，限制了其最高转换效率，通过将其与对应的宽带隙吸光材料 ($1.6\text{-}1.7\text{eV}$) 结合构建叠层电池可有效实现效率提升，目前钙钛矿/晶硅叠层电池的实验室内最高效率已达到 31.3%，并有望在未来继续提升至 35% 以上。虽然钙钛矿有望成为光伏领域的终极技术形态从而颠覆现有的晶硅体系，但由于晶硅可以与钙钛矿做叠层电池，二者结合量产转换效率有望做到 30% 以上，因此对于晶硅电池体系来说，钙钛矿也是一种发展机遇。
- **钙钛矿两大困扰仍待解决。**当前钙钛矿光伏产业化最大的障碍即材料稳定性较弱、电池寿命较短。目前为止的研究表明，通过元素工程设计晶体结构稳定的钙钛矿材料，并结合界面工程实现太阳能电池结构设计的优化，杂化钙钛矿太阳能电池的稳定性问题是有望完全解决的。而实现高效率钙钛矿电池的大面积制备是其产业化的另一大挑战。对大多数光伏技术来说，大面积制备往往伴随着电池效率的降低，这主要是由于电池面积增大伴随着串联电阻的线性增大。对于钙钛矿电池而言，这种随电池面积增加而性能降低的现象更加明显，未来也是需要解决的一大障碍。
- **上下游加快布局，产业化进程有望提速。**近年来随着市场对光伏技术的关注度不断提升，钙钛矿产业化布局也开始提速。业内企业在原材料、生产工艺、电池结构与设备端不断取得突破，努力去解决钙钛矿组件的稳定性、大面积制备和高效率的“不可能三角”问题。在这个过程中，不仅有新势力企业积极布局钙钛矿主产业链，更有传统晶硅设备企业研发钙钛矿核心设备并实现实验线设备的交付。多方力量共同推动，钙钛矿产业化进程有望提速，预计 2026 年钙钛矿组件产能有望达到 37GW。

投资分析意见：

- 未来随着钙钛矿产业化进程不断提速，钙钛矿设备与组件企业有望持续受益，按照目前市场上已经公开的扩产规划，我们预计到 2026 年，钙钛矿产能有望达到 37GW。建议关注在钙钛矿核心设备布局较为领先的钙钛矿企业如京山轻机、杰普特等。对于钙钛矿组件企业来说，随着产业化进程加速和技术进步，钙钛矿组件未来的生产成本有望大幅降低，届时钙钛矿组件的产品竞争力将显著提升，市场份额也将不断提升。且凭借超高的光电转换效率，未来钙钛矿与晶硅叠层的电池技术有望成为光伏领域的终极技术形态，建议关注在钙钛矿领域具有前瞻性布局的企业如奥联电子、宝馨科技等。

风险提示：

- 1) 钙钛矿技术进展不及预期；2) 光伏装机不及预期；3) 相关标的业务进展不及预期。



申万宏源研究微信服务号

投资案件

结论和投资分析意见

未来随着钙钛矿产业化进程不断提速，钙钛矿设备与组件企业有望持续受益，按照目前市场上已经公开的扩产规划，我们预计到 2026 年，钙钛矿产能有望达到 37GW。建议关注在钙钛矿核心设备布局较为领先的钙钛矿企业如京山轻机、杰普特等。

对于钙钛矿组件企业来说，随着产业化进程加速和技术进步，钙钛矿组件未来的生产成本有望大幅降低，届时钙钛矿组件的产品竞争力将显著提升，市场份额也将不断提升。且凭借超高的光电转换效率，未来钙钛矿与晶硅叠层的电池技术有望成为光伏领域的终极技术形态，建议关注在钙钛矿领域具有前瞻性布局的企业如奥联电子、宝馨科技等。

原因及逻辑

1、降本增效为光伏产业发展的主逻辑，随着 N 型 TOPCon 和异质结的量产，光伏的发展势必要寻求下一代电池技术；

2、在晶硅体系下，光伏电池的理论极限转换效率约为 28%，而钙钛矿电池技术有望将光伏电池的量产转换效率提升至 30% 以上；

3、目前钙钛矿产业化进程已经开始起步，未来随着技术突破和量产加速，钙钛矿组件的经济性将会凸显。目前为钙钛矿产业化初期阶段，未来成长空间巨大。

有别于大众的认识

市场普遍认为钙钛矿可能会颠覆现有晶硅技术体系，我们认为钙钛矿和晶硅的叠层尤其是和异质结的叠层具有较高的发电效率，且可以利用现有晶硅产能，因此钙钛矿技术对于晶硅体系来说机遇大于挑战；

市场普遍认为钙钛矿的产业化短期难以看到进展，我们认为一旦现有光伏技术成熟，市场就会积极去寻找下一代光伏技术。随着 TOPCon 和异质结的量产，钙钛矿或将成为下一代光伏电池技术，目前市场对钙钛矿的关注度已经提高，未来随着各方推动，钙钛矿的产业化进程或将加速。

目录

1. 钙钛矿光伏横空出世，效率屡创新高.....	6
1.1 钙钛矿光伏是什么？	6
1.2 钙钛矿电池结构	7
1.2.1 nip 与 pin 型钙钛矿电池	8
1.2.2 介孔型与平面型	10
1.3 钙钛矿电池发电原理	11
1.4 钙钛矿光伏电池转换效率突飞猛进	12
1.5 叠层钙钛矿——光电转换效率天花板	13
1.5.1 钙钛矿/晶硅叠层电池	14
1.5.2 全钙钛矿叠层电池	17
2 . 钙钛矿电池制备方法	18
3 . 优点众多且突出，光环下仍需关注短板	22
3.1 三大优点突出：高效率、低成本、可室温柔性制备	22
3.1.1 高效率	22
3.1.2 低成本	23
3.1.3 可低温柔性制备	24
3.2 钙钛矿应用场景广阔	25
3.3 两大困扰待解决：稳定性、大面积制备	26
3.3.1 稳定性	26
3.3.2 大面积制备	27
4 . 上下游加快布局，产业化进程有望提速	28
5 . 投资分析意见	32
6 . 风险提示	33

图表目录

图 1：钙钛矿型材料结构	6
图 2 钙钛矿电池结构与发电原理	8
图 3 钙钛矿电池 nip 与 pin 结构.....	8
图 4 钙钛矿电池两种结构效率对比	9
图 5 介孔型钙钛矿电池结构	10
图 6 平面型钙钛矿电池结构	10
图 7 钙钛矿电池发电原理	11
图 8 激子行程过程	11
图 9 钙钛矿光伏和晶硅光伏效率进展对比	12
图 10 光伏电池吸光层数量与理论最大效率关系	13
图 11 晶硅光伏技术演化.....	14
图 12 主要晶硅技术市占率预测.....	15
图 13 钙钛矿硅叠层电池结构	16
图 14 钙钛矿/晶硅叠层电池效率进展	16
图 15 全钙钛矿叠层电池.....	17
图 16 晶硅/钙钛矿叠层度电成本	18
图 17 全钙钛矿叠层度电成本	18
图 18 钙钛矿电池制备流程	18
图 19 溶液法钙钛矿吸光层的制作方式.....	19
图 20 几种主要液相制备钙钛矿图示与市场占比	20
图 21 蒸镀法制备钙钛矿电池	20
图 22 钙钛矿各层制备方法与对应材料.....	21
图 23 主流光伏电池技术效率对比	22
图 24 钙钛矿电池效率进展图	23
图 25 钙钛矿组件成本构成	24
图 26：柔性钙钛矿电池应用实例	24
图 27 钙钛矿在 BIPV 的应用场景	25
图 28 钙钛矿在车顶的应用场景.....	25

图 29 钙钛矿电池稳定性影响因素	26
图 30 大面积钙钛矿电池效率	27
图 31 液相法 vs 蒸镀法制备钙钛矿电池效率对比	28
图 32 钙钛矿电池商业化路线图	29
图 33 纤纳光电 100MW 钙钛矿项目投资成本构成	29
图 34 钙钛矿产线建设规模效应明显	29
图 35 钙钛矿电池生产核心环节及设备	30
表 1：钙钛矿材料及电池的主要特点	7
表 2：晶硅光伏三大主流技术对比	15
表 3：钙钛矿/晶硅叠层电池与全钙钛矿叠层电池对比	17
表 4：液相法制备工艺	19
表 5：主流光伏电池技术效率对比	22
表 6：近期钙钛矿行业政策	28
表 7：未来 5 年钙钛矿产能预计（MW）	30
表 8：近年来国内钙钛矿设备厂商动态	30
表 9：近年来国内钙钛矿电池厂商主要动态	31
表 10：国内钙钛矿材料厂动态	32
表 11：钙钛矿相关标的介绍	33
表 12：重点公司估值表	35

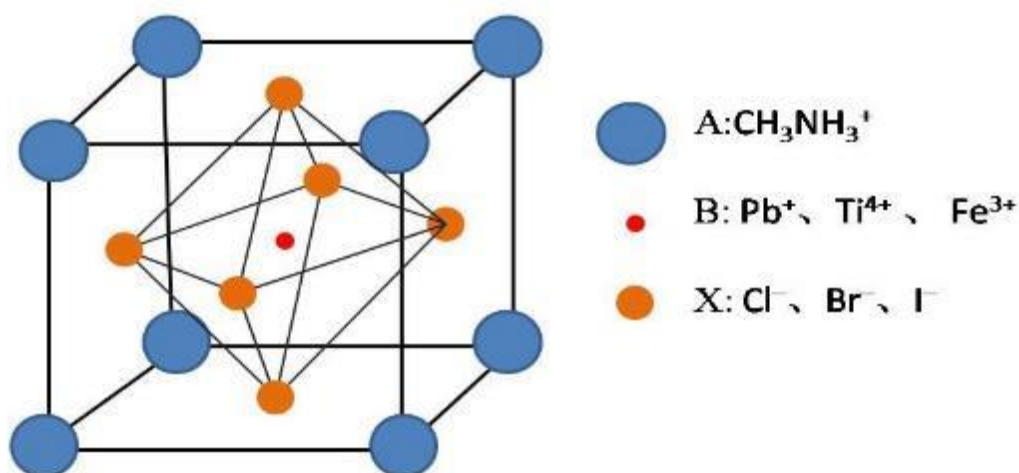
1. 钙钛矿光伏横空出世，效率屡创新高

1.1 钙钛矿光伏是什么？

钙钛矿是以俄罗斯矿物学家 Perovski 的名字命名的，最初单指钛酸钙（ CaTiO_3 ）这种矿物，后来把结构为 ABX_3 以及与之类似的晶体统称为钙钛矿物质。

其中 A 离子处于立方晶体结构的八个顶角位置，一般是正一价的阳离子，例如有机甲胺离子 CH_3NH_3^+ 、有机甲脒离子 $\text{NH}_2\text{CH}=\text{NH}_2^+$ 和无机铯离子（ Cs^+ ）等。B 离子处于立方体的体心位置，通常是正二价的金属离子，例如亚铅离子（ Pb^{2+} ）、亚锡离子（ Sn^{2+} ）和亚锗离子（ Ge^{2+} ）等。X 离子处于立方体的面心位置，大部分是负一价的卤素离子，例如氟离子（ F^- ）、氯离子（ Cl^- ）、溴离子（ Br^- ）和碘离子（ I^- ）等。A 位离子的半径大小需要满足一定基本条件，必须能够填充构成钙钛矿晶体。一个 B 位离子和六个 X 位离子形成 BX_6 型的八面体结构，A 位离子半径必须足够延伸到该框架内。因此，A 位离子的半径总是比 B 位离子半径大。钙钛矿型立方体结构稳定与否是由各离子之间的距离决定。

图 1：钙钛矿型材料结构



资料来源：Ofweek，申万宏源研究

作为钙钛矿电池的核心，钙钛矿材料具有众多优异的性质，如吸光系数高、载流子迁移率高、缺陷容忍度较高等。这些性质相应的使得其电池具有一系列优点，如制备简单、成本低廉、可实现超轻超薄等。此外，通过对其化学成分进行调整优化，从而可以制备不同特点的钙钛矿材料面向不同应用场景，如半透明太阳能电池、彩色光伏玻璃等。材料的禁带宽度可以通过改变组成物质的种类及比例来调控，能覆盖的光谱吸收范围宽至红外波段，同时具备载流子扩散距离长和迁移率高的优点。需要指明的是，钙钛矿材料的光电性质使其不仅可以用于制备光伏电池，也可以用于发光二极管（LED）、光探测器、晶体管、催化剂等各类应用中。

表 1：钙钛矿材料及电池的主要特点

材料特点	电池特点
原材料为基础化工品	制备成本低
可液相制备	制备温度较低；可制备柔性器件；节省原材料
吸光系数高	电池厚度很薄，可制备超轻超薄器件
载流子迁移率高	结构简单，性能优异
缺陷容忍度高	对原材料纯度要求低
材料组分可调	可实现叠层电池、半透明电池、彩色光伏玻璃等多类型应用

资料来源：公开资料，申万宏源研究

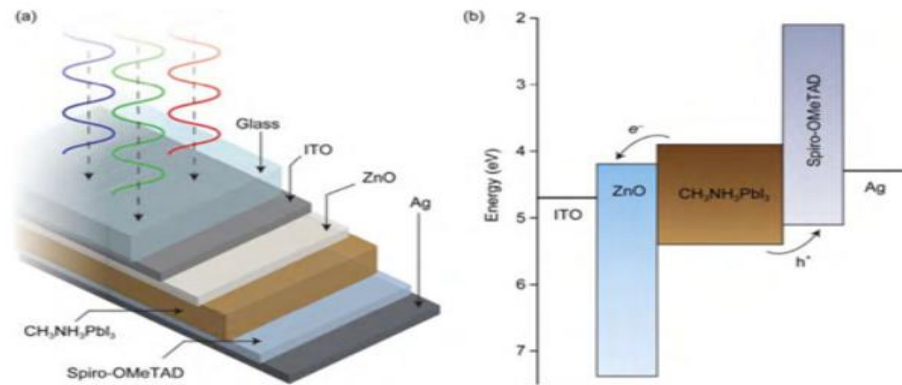
1.2 钙钛矿电池结构

随着钙钛矿光伏研究的不断深入，逐渐涌现出多种技术路线。按照吸光层数量，可将其划分为单结和多结（叠层）电池；按照吸光层的放置形式，可将其划分为介孔型（mesoporous）和平面型（planar）；按照电荷传输层的排列，可将其划分为正式（n-i-p）和反式（p-i-n）结构电池。此外，体异质结、梯度异质结等新型器件结构也逐渐被研发。

单结电池是最简单、最普遍的钙钛矿电池形式。通常一个单结电池结构中包括五个部分：

- 钙钛矿吸光层：用于吸收入射光，产生空穴和电子两种载流子，从而实现将光能转化为电能。
- 空穴传输层（HTL）：将生成的空穴抽取并传输至阳极，并阻挡电子通过。
- 电子传输层（ETL）：将生成的电子抽取并传输至阴极，并阻挡空穴通过。
- 透明导电氧化物电极（TCO）：通常为光入射面，并与外电路相连。
- 金属电极：通常为光反射面，并与外电路相连。

图 2 钙钛矿电池结构与发电原理



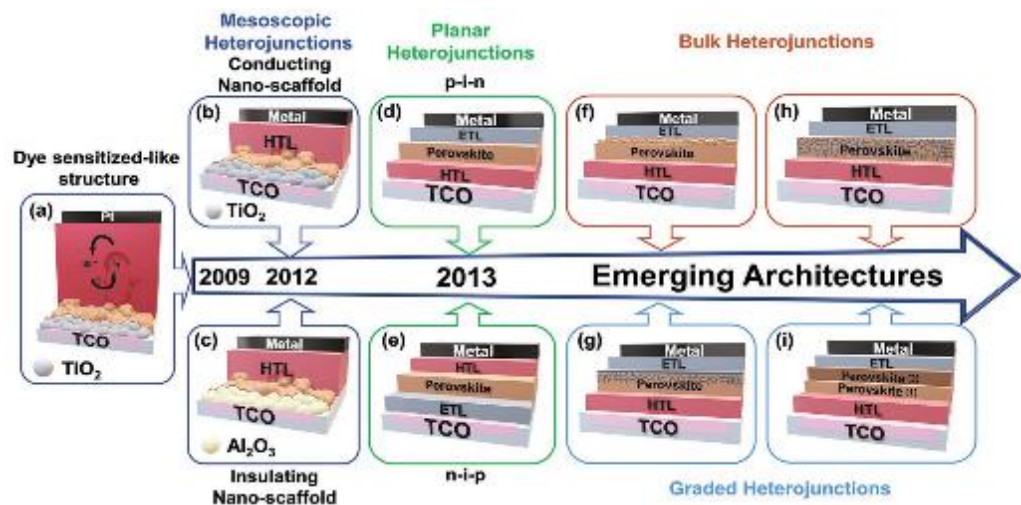
资料来源：Cheersonic，申万宏源研究

从各种关键材料的能级图中可以看出，钙钛矿材料 MAPbI_3 受到入射光照射后，将吸收能量大于其禁带宽度的光子，并产生光生载流子，光生载流子分离为空穴和电子并分别注入电荷传输材料中。其中空穴从钙钛矿材料进入空穴传输材料 Spiro-OMeTAD，电子从钙钛矿材料进入电子传输材料 TiO_2 ，最后分别通过金属电极 Au 和透明导电基底 ITO 传输至外电路。

1.2.1 nip 与 pin 型钙钛矿电池

钙钛矿太阳能电池的组成按照功能分层一般可分为五层：阳极层、空穴传输层、光吸收层、电子传输层以及阴极层。根据需要还可以再加上电子修饰层和空穴修饰层。根据五个基本功能层的顺序可分为 nip 型结构和 pin 型结构。nip 型结构各层由下至上分别为：阴极层、电子传输层、光吸收层、空穴传输层、阳极层。pin 型结构各层分布不同的是电子传输层和空穴传输层，即为：阳极层、空穴传输层、光吸收层、电子传输层、阴极层。各层起到不同的作用，共同构成完整电池。

图 3 钙钛矿电池 nip 与 pin 结构



资料来源：Advanced functional materials，申万宏源研究

以 pin 型为例：

阳极层一般是 ITO 导电玻璃，FTO 导电玻璃等，起收集空穴，构成电池阳极的作用。

空穴传输层通常是 PEDOT:PSS 等材料，该层与电池的光吸收层的界面处的接触形成欧姆接触，能够高效地传输由活性层产生的自由空穴，且需要有效地阻挡住界面处自由电子的通过，进而避免电子与空穴的复合。

光吸收层，即钙钛矿电池的活性层，由钙钛矿材料组成，该层是整个电池结构的核心位置，其成膜质量好坏直接决定了器件性能优劣。

电子传输层通常是 PCBM 或 C60 等材料，该层需要高效的传输光吸收层产生的自由电子，有效的阻挡自由空穴的通过，且与活性层的界面处形成欧姆接触。

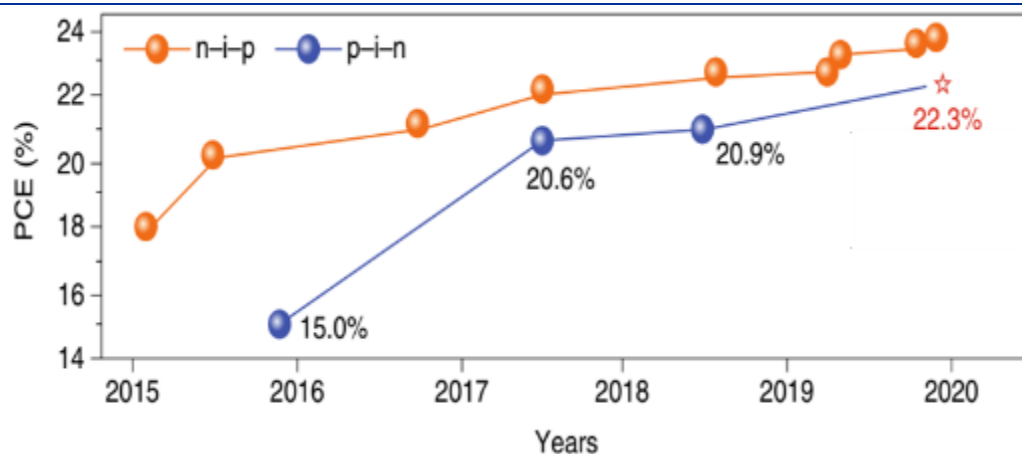
阴极层，一般是铝、银和铜等金属材料。

钙钛矿单结电池主要分为 n-i-p 和 p-i-n 型两种结构路线。两者区别在于载流子传输层 ETL/HTL 相对于钙钛矿吸光层的位置。由于需要与钙钛矿材料以及 TCO 能级匹配的要求，在两种结构中可用作 ETL/HTL 材料的选择均较有限。

钙钛矿电池脱胎于染料敏化 n-i-p 结构电池，因而研究较早且更加深入，目前钙钛矿电池最高效率（25.7%）即采用该种结构。对于 n-i-p 结构电池，ETL 常使用氧化钛。由于氧化钛制备过程涉及数百度高温加热，近年来氧化锡被视为替代氧化钛的最佳选择。得益于优异的空穴传输能力，spiro-OMeTAD 通常被视为高效率 n-i-p 电池中 HTL 的“唯一”选择。但其较差的稳定性及较高的制备成本使得学界不断探索新的 HTL 材料。

相比而言，p-i-n 结构电池发展要略晚一些，因此其效率略低于 n-i-p 结构电池。但最近几年发展十分迅速。该结构摆脱了对 spiro-OMeTAD 的依赖，拥有 PTAA、氧化镍、polyTPD、自组装小分子等多种高效 HTL 的选择，目前 p-i-n 电池已经成为新的研究热点。

图 4 钙钛矿电池两种结构效率对比



资料来源：Nature Energy，申万宏源研究

1.2.2 介孔型与平面型

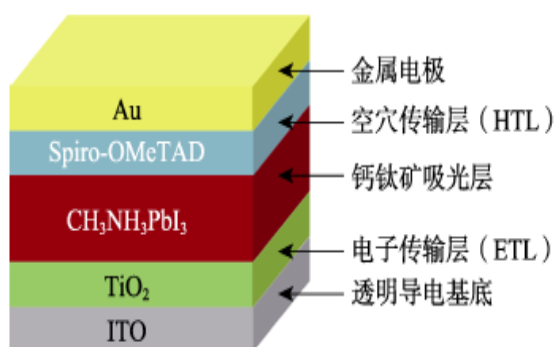
早期钙钛矿材料被用在染料敏化电池的吸光层中作敏化剂，即为介孔型钙钛矿单结电池。随后将介孔材料替换为薄膜材料后，演化为平面型电池结构。介孔型钙钛矿太阳能电池发展最早、效率最高、材料和工艺最成熟，也是目前普遍研究的一类钙钛矿太阳能电池。介孔结构的钙钛矿太阳能电池为：FTO 导电玻璃、TiO₂ 致密层、TiO₂ 介孔层（多孔 TiO₂ 支架层）、钙钛矿层、HTM 层、金属电极。

透明导电基底是其他材料的载体，同时还是光线透过的窗口，并负责将收集到的光电子传送至外电路，透明导电基底一般采用氧化铟锡导电玻璃（ITO）或氟掺杂的氧化锡导电玻璃（FTO）。

电子传输层由致密 TiO₂ 和介孔 TiO₂ 两层材料组成，致密 TiO₂ 直接制作在透明导电基底上，阻止导电基底与钙钛矿材料的直接接触，避免空穴向导电基底传输；介孔 TiO₂ 既起到支撑框架作用，辅助钙钛矿生长，形成多孔 TiO₂/钙钛矿混合层，又起到关键的传输电子的作用。常用的致密层制备方法有旋涂法、喷雾热解、ALD 法、磁控溅射法等，其中以喷雾热解法和旋涂法最为常用。前者的工艺相对较为稳定，重现性较好。后者由于使用成本更低，操作简单，因此成为制作致密层的主流方法。

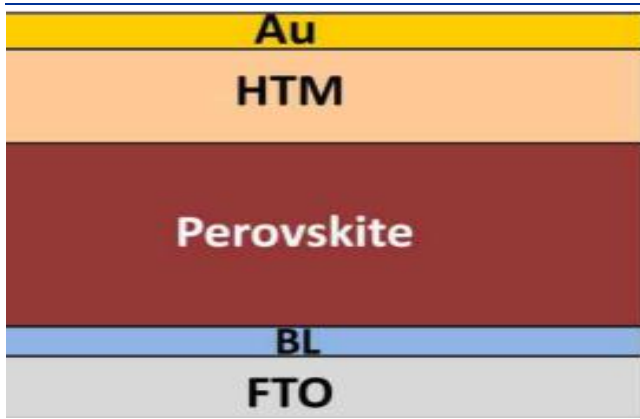
钙钛矿吸光层则是钙钛矿太阳能电池中吸收太阳光、产生光电子的活性材料，目前成熟的钙钛矿材料是碘化铅甲胺（MAPbI₃）。空穴传输层的作用是提取和传输光生空穴，常用 Spiro-OMeTAD。金属电极的作用是传输电荷并连接外电路，一般通过在空穴传输层外面蒸镀一层金而获得。

图 5 介孔型钙钛矿电池结构



资料来源：知网，申万宏源研究

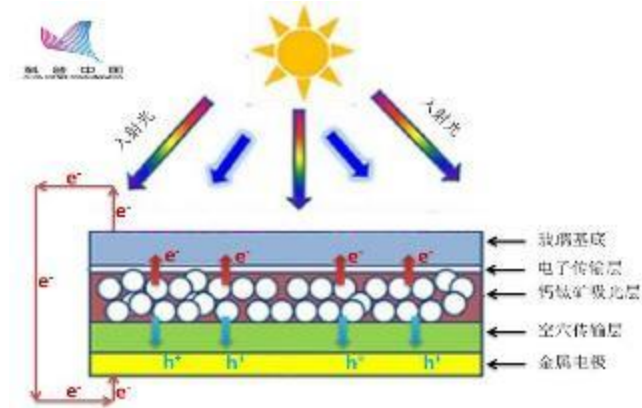
图 6 平面型钙钛矿电池结构



资料来源：物理学报，申万宏源研究

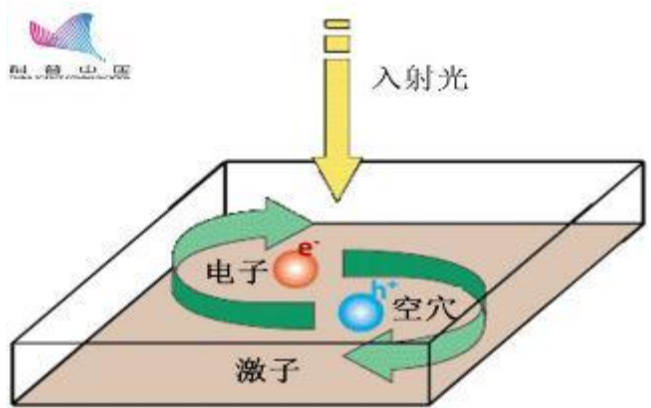
1.3 钙钛矿电池发电原理

图 7 钙钛矿电池发电原理



资料来源：科普中国，申万宏源研究

图 8 激子行程过程



资料来源：科普中国，申万宏源研究

钙钛矿太阳能电池是一种将光能转化为电能的装置，其本质是半导体二极管，发电原理也正是基于 PN 结的光生伏特现象。PN 结是由一个 N 型掺杂区（N 为 Negative 的字头，这类半导体由于含有较高浓度的电子，带负电而得此名）和一个 P 型掺杂区（P 为 Positive 的字头，这类半导体由于含有较高浓度的“空穴”，相当于正电荷，带正电而得此名）紧密接触所构成的，其接触界面称为异质结界面（PN 结）。当太阳光照射在半导体 PN 结上时，会激发形成空穴-电子对（激子）。由光照产生的激子首先被分离成为电子和空穴，然后分别向阴极和阳极输运。带负电的自由电子经过电子传输层进入玻璃基底，接着经外电路到达金属电极。带正电的空穴则扩散到空穴传输层，最终也到达金属电极。在此处，空穴与电子复合，电流形成一个回路，完成电能的运输。

钙钛矿器件的工作机制总体可以被划分为五个过程：

（1）光子吸收过程：受到太阳光辐射时，电池的钙钛矿层吸收光子产生受库仑力作用束缚的电子-空穴对，由于钙钛矿材料激子束缚能的差异，这些载流子或者成为自由载流子，或者形成激子。

（2）激子扩散过程：激子产生后不会停留在原处，会在整个晶体内运动。激子的扩散长度足够长，激子在运动过程发生复合的几率较小，大概率可以扩散到界面处。而且，因为钙钛矿材料往往具有较低的载流子复合几率和较高的载流子迁移率，所以载流子的扩散距离和寿命较长。

（3）激子解离过程：钙钛矿材料的激子结合能小，在钙钛矿光吸收层与传输层的界面处，激子在内建电场的作用下容易发生解离，其中电子跃迁到激发态，进入 LUMO 能级，解除束缚的空穴留在 HOMO 能级，进而成为自由载流子。

(4) 载流子传输过程：激子解离后形成的自由载流子，其中自由电子通过电子传输层向阴极传输，自由空穴通过空穴传输层向阳极传输。

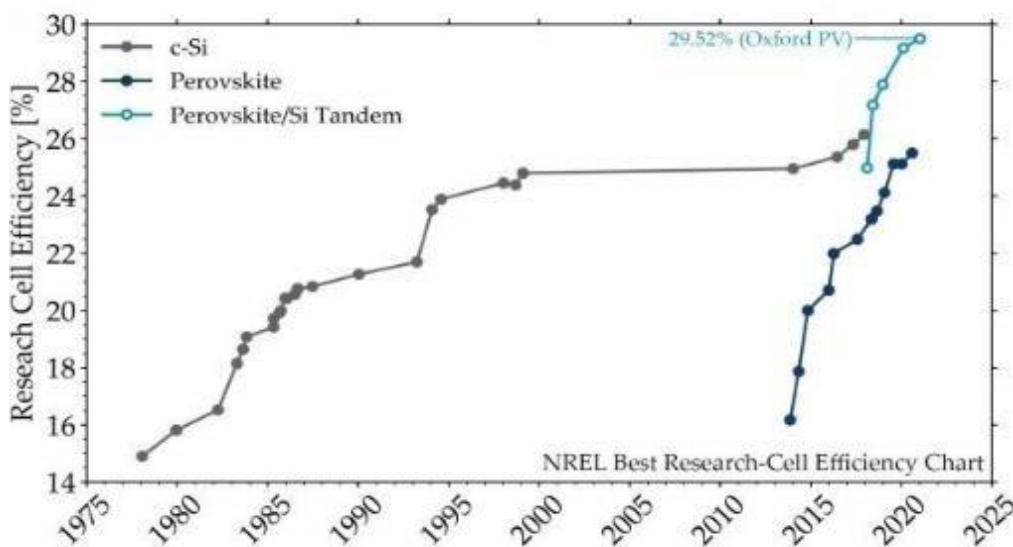
(5) 电荷收集过程：自由电子通过电子传输层后被阴极层收集，自由空穴通过空穴传输层后被阳极层收集，两极形成电势差。电池与外加负载构成闭合回路，回路中形成电流。

1.4 钙钛矿光伏电池转换效率突飞猛进

光伏发电成本依赖于太阳能电池的光电转换效率。有研究显示，转换效率每提升 1%，发电成本可降低 7%，但目前晶硅太阳能电池光电转换效率遭遇发展瓶颈，因此，研发制备更低成本、更高效率的太阳能电池是实现光伏发电平价上网的关键，也将为实现“双碳”目标提供重要科技支撑。

第一片钙钛矿光伏电池于 2009 年由日本科学家 Miyasaka 制备，其光电转换效率 (PCE) 仅有 3.8%，远远低于同时期已经实现商业化应用的硅光伏电池。2012 年，韩国的 Park 和英国牛津的 Snaith 分别对电池结构进行了调整优化，使得钙钛矿电池效率突破了 10% 大关，吸引了全球学术界的关注。随后钙钛矿材料优异的性质被充分研究挖掘，电池效率也快速攀升至 25.7%，在短短十余年内几乎追赶上晶硅光伏电池过去四十余年的最佳效率 26.7%，使其具备了未来挑战晶硅光伏电池主导地位的实力。

图 9 钙钛矿光伏和晶硅光伏效率进展对比



资料来源：NREL，申万宏源研究

从理论上讲，目前单层钙钛矿太阳能电池的光电转换效率最高为 33%，双层结构可以高达 45%。22 年 6 月，南京大学现代工程与应用科学学院和英国牛津大学学者，运用涂布印刷、真空沉积等技术，在国际上首次实现了大面积全钙钛矿叠层光伏组件的制备，开辟了大面积钙矿叠层电池的量产化、商业化的全新路径。经国际权威第三方测试机构认证，

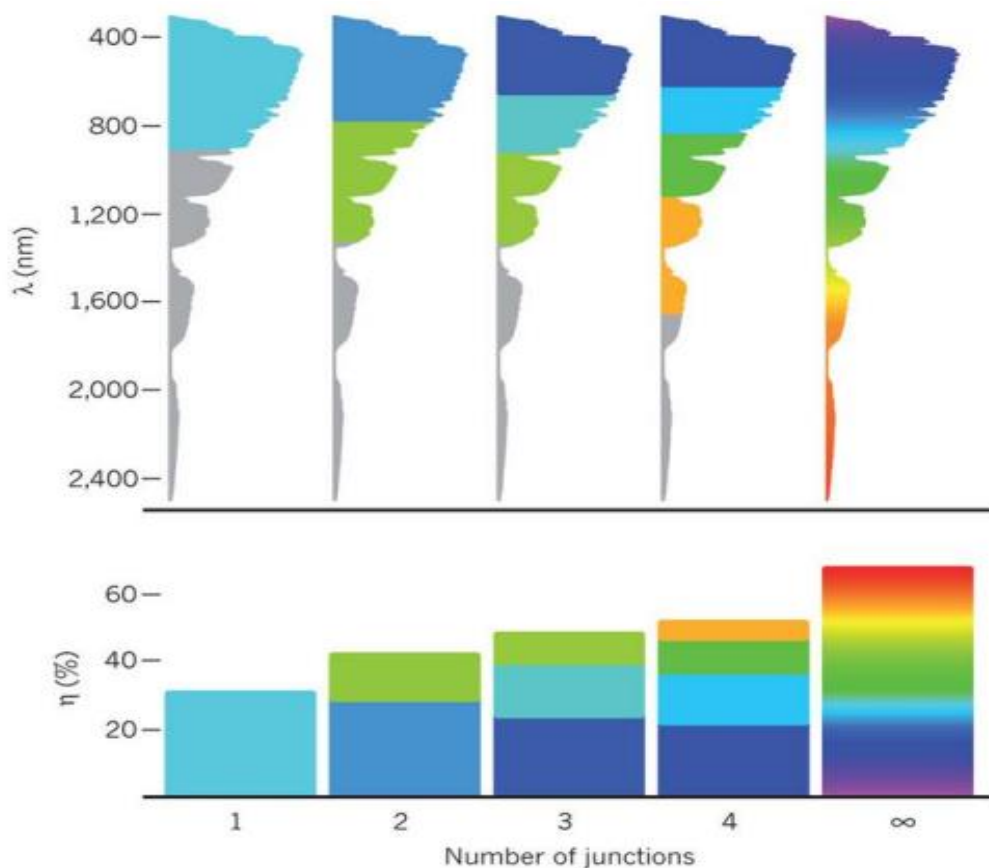
该组件稳定的光电转换效率高达 21.7%，是目前已知的钙钛矿光伏组件的世界最高效率。该成绩被最新一期的《太阳电池世界纪录表》收录，相关成果近日刊发于国际权威学术期刊《科学》。

1.5 叠层钙钛矿——光电转换效率天花板

当前产业化晶硅单结太阳能电池的光电转换效率已经达到 23~25%，实验室最高效率也已达~27%，十分接近单结理论最大效率~31%，进一步提升单结晶硅电池效率的空间极为有限。通过使用多层吸光层来构建叠层结构的光伏电池，可以更加充分的利用入射的太阳光，拥有更高的理论效率天花板。如下图所示，在理想情况下，两结叠层电池的理论效率大幅提升至~45%，更多吸光层可以继续增加理论效率，但边际效益显著下降，因而从性能和经济性考虑，两结叠层电池是未来产业化的主要方向。

叠层电池中，通常包含一个宽带隙吸光层（1.6-2.0 eV，用于吸收蓝光范围）和一个窄带隙吸光层（0.9-1.4 eV，用于吸收红光范围）。前述提到，钙钛矿由于其化学组分可以调整（晶硅、砷化镓等半导体不具备此性质），因而较为容易控制其带隙和吸光范围，非常适合用于制备叠层电池。当前基于钙钛矿的叠层电池主要有两种技术路线：钙钛矿/晶硅叠层和全钙钛矿叠层电池。此外还有钙钛矿/有机叠层电池、钙钛矿/CIGS 叠层电池等正在探索的方案。

图 10 光伏电池吸光层数量与理论最大效率关系



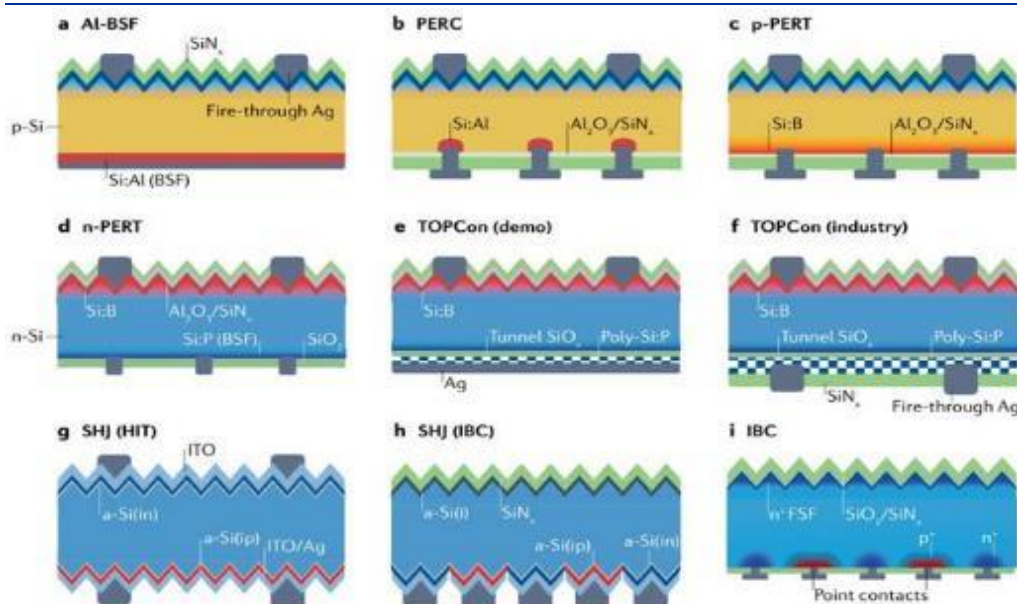
资料来源：Nature，申万宏源研究

1.5.1 钙钛矿/晶硅叠层电池

由于晶硅具有窄带隙的特点，其吸收短波长光子时会产生较大的能量损失，限制了其最高转换效率，通过将其与对应的宽带隙吸光材料（1.6-1.7eV）结合构建叠层电池可有效实现效率提升，目前钙钛矿/晶硅叠层电池的实验室内最高效率已达到 31.3%，并有望在未来继续提升至 35%以上。

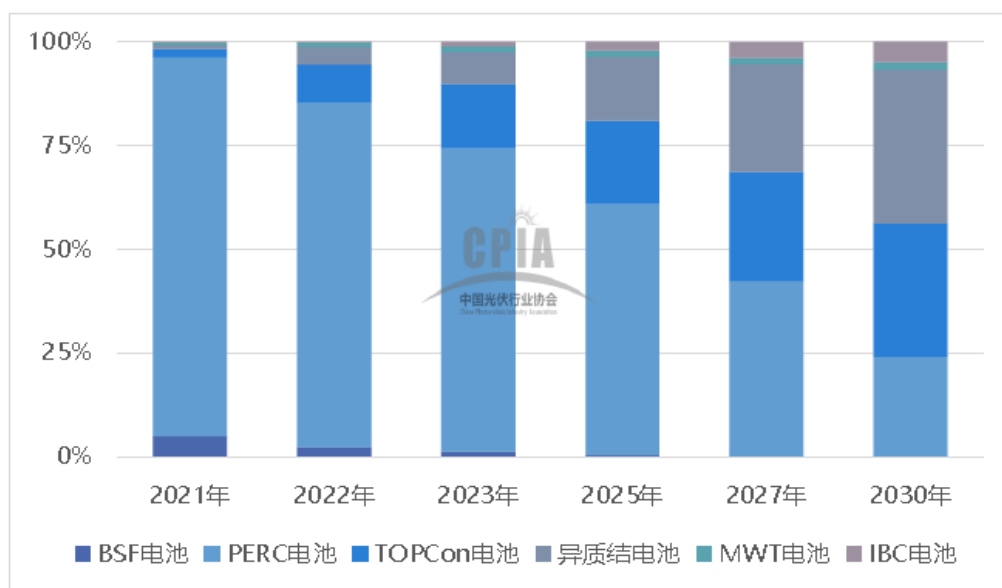
目前晶硅光伏有三大主流技术路线：PERC、TOPCon、HIT。尽管目前 PERC 仍占有较大的市场份额，但按照各厂商新增产线产能来看，未来 3-5 年内，TOPCon 和 HIT 将迅速投产放量，有望在 2030 年前实现三足鼎立之势。因此当前钙钛矿/晶硅叠层技术研发主要为钙钛矿/HIT 和钙钛矿/TOPCon 两种路线。

图 11 晶硅光伏技术演化



资料来源：Nature Review Materials，申万宏源研究

图 12 主要晶硅技术市占率预测



资料来源：CPIA，申万宏源研究

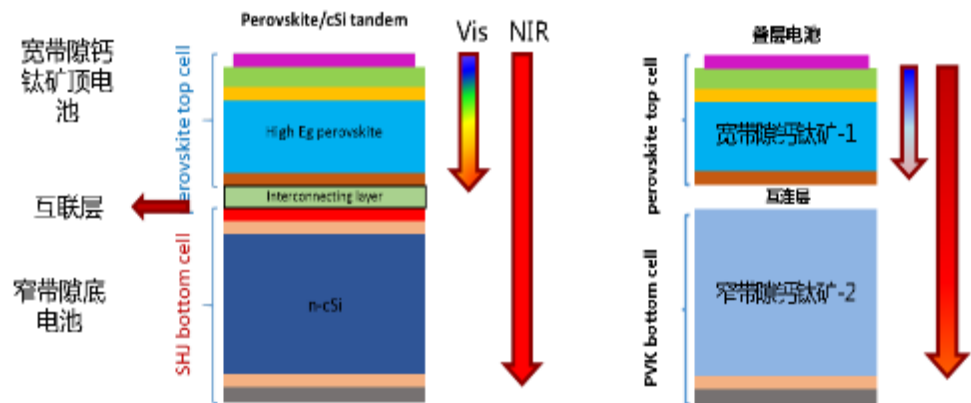
表 2：晶硅光伏三大主流技术对比

	PERC	TOPCon	HIT
理论最高效率 (%)	24.5	28.7	27.5
器件厚度 (μm)	170-190	150-160	90-140
制备工艺	工序中等	工序复杂	工序简单
生产成本 (元/W)	0.6-0.8	0.7-0.9	1.0-2.0
设备投资 (亿元/GW)	1.2-1.5	2~2.5(从 PERC 升级成本为 0.5)	3.5~4.5

资料来源：公开资料，申万宏源研究

钙钛矿太阳能电池的带隙可调、转换效率高且制备成本低廉等特点，使其适合用于构筑高效率、低成本的串联叠层太阳能电池。构筑串联叠层器件是提升电池效率的重要途径，其中宽带隙顶电池吸收短波长的太阳光，窄带隙底电池吸收未被宽带隙顶电池利用的长波长太阳光。通过使用不同带隙的半导体材料，可以减小单结电池中载流子热驰豫导致的能量损失，同时还可拓宽太阳能光谱的利用范围，从而提高电池效率。

图 13 钙钛矿硅叠层电池结构



资料来源：仁烁光能，申万宏源研究

TOPCon 技术与当前主流的 PERC 技术一脉相承，依托现有设备和产线升级，可以大幅提高晶硅电池的效率，与钙钛矿相结合构建钙钛矿/TOPCon 叠层电池可以最大程度上利用现有 PERC 设备和产线。相比而言，HIT 电池具有工序简单的特点，可以缩短出货周期，长期来看成本优势明显，但其与 PERC 及 TOPCon 具有较大差异，无法利用现有 PERC 设备产线。近年来，钙钛矿/晶硅叠层电池效率屡创新高，主要采用钙钛矿/HIT 组合。

图 14 钙钛矿/晶硅叠层电池效率进展

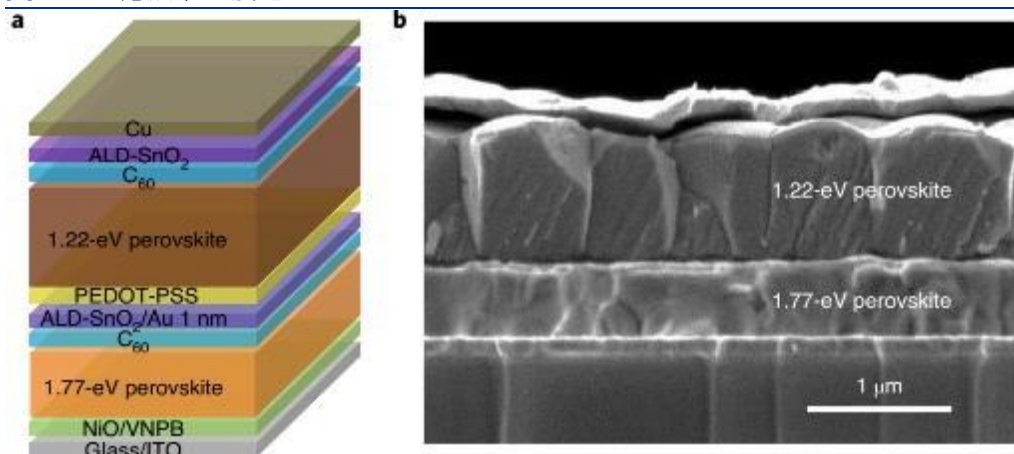


资料来源：《钙钛矿及其叠层太阳能电池现状及发展趋势_张晓丹》，申万宏源研究

1.5.2 全钙钛矿叠层电池

钙钛矿组分可调的特点使得其不仅可以用作宽带隙吸光层，也可以调整得到窄带隙吸光层，两者结合即可得到全钙钛矿叠层电池。相比于钙钛矿/晶硅叠层仍然对晶硅产有很高的依赖性，全钙钛矿叠层完全无需依赖于现有晶硅产业链，因此可以充分释放钙钛矿自身优势，如吸光能力强（器件轻薄、可柔性）、成本低、可低温加工等。将钙钛矿单结电池的制备工艺略加调整即可升级制备全钙钛矿叠层电池。

图 15 全钙钛矿叠层电池



资料来源：Nature Energy，申万宏源研究

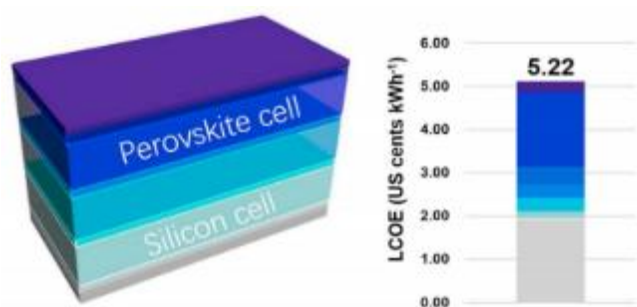
表 3：钙钛矿/晶硅叠层电池与全钙钛矿叠层电池对比

	钙钛矿/晶硅（HIT）叠层	全钙钛矿叠层
理论最高效率（%）	>40	>40
当前最高效率（%）	31.3	28.0
初始产能投资（亿元/GW）	8-10	3-5
生产成本（元/W）	1.2-3	0.2-0.9
最高工艺温度（℃）	>1500	<200
产业链	晶硅+钙钛矿	钙钛矿
器件厚度（μm）	~102	<1
柔性器件	X	√

资料来源：纤纳光电，申万宏源研究

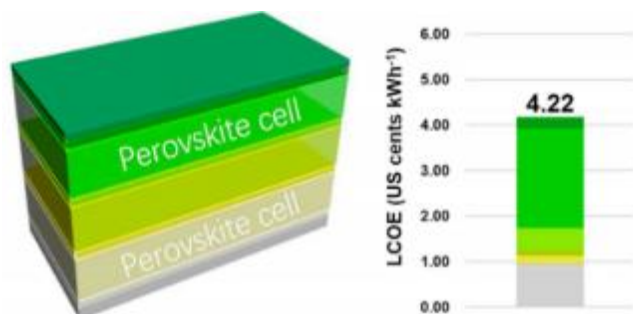
据仁烁光能介绍，全钙钛矿叠层电池的理论转换效率可达 43%，产业化量产效率有望做到 35%以上；在度电成本方面，全钙钛矿度电成本约为 4.22 美分，较晶硅/钙钛矿叠层电池的度电成本略低。

图 16 晶硅/钙钛矿叠层度电成本



资料来源：仁烁光能，申万宏源研究

图 17 全钙钛矿叠层度电成本

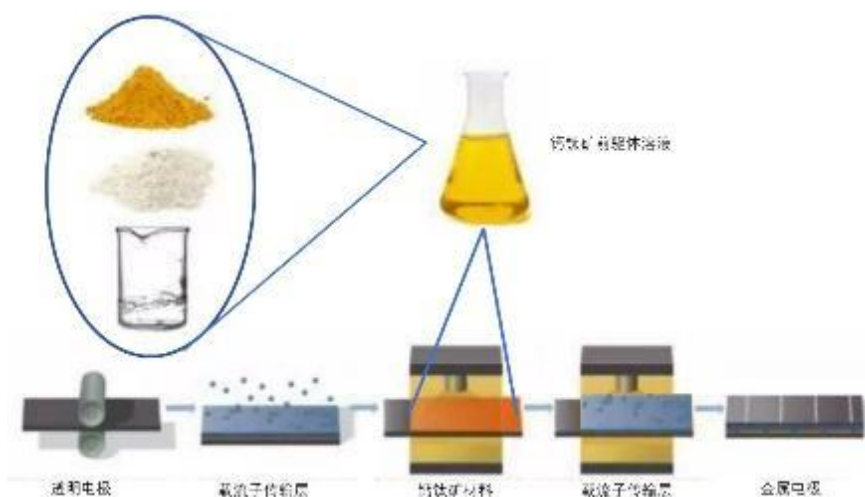


资料来源：仁烁光能，申万宏源研究

2. 钙钛矿电池制备方法

钙钛矿光伏电池的制备流程如下：

图 18 钙钛矿电池制备流程



资料来源：牛津光伏，申万宏源研究

1) 材料制备：钙钛矿材料制备主要包括致密层 TiO_2 胶体、介孔层 TiO_2 胶体、钙钛矿前驱体溶液、Spiro 溶液材料的制备。

2) 处理导电基地：ITO 导电玻璃一般用 Zn 粉和盐酸溶液刻蚀后，放入洗洁精水溶液中超声清洗。搓洗干净后再依次用去离子水、无水乙醇、丙酮、异丙醇分别超声清洗。最后，将 ITO 导电玻璃用氮气吹干，并用氧气等离子清洗。

3) 制作电子传输层：电子传输层由致密层 TiO_2 和介孔层 TiO_2 两层材料组成，采用依次旋涂成膜的方式制备。

4) 制作钙钛矿吸光层：吸光层的制作是钙钛矿太阳能电池组装的关键步骤，其成膜质量受环境温度、环境湿度、环境含氧量、退火温度、退火时间、操作手法等多个因素影响，并在很大程度上影响了最终器件的性能。钙钛矿吸光层 MAPbI_3 的制作方法主要包括溶液法（或者旋涂法）、共蒸发法和气相辅助溶液法。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/156214214115010211>