

光伏产业研究系列报告（5）：薄膜电池——历经周期洗礼，又到拐点时刻



东方证券
ORIENT SECURITIES

核心观点

- 薄膜电池是继晶硅电池之后出现的新一代电池技术，由于采用直接带隙半导体材料代替晶体硅发电，在理论上有着更高的转换效率和更低的生产成本，并一度占据了性价比优势。过去几年份额的萎缩主要由于薄膜电池技术壁垒极高，市场参与者较少，竞争不够充分。近年来薄膜电池在生产工艺和新技术上都出现了巨大飞跃，CdTe 电池和钙钛矿电池的成果尤其突出，其生产成本有望低于晶硅电池，此外，薄膜电池可实现定制化生产，应用场景远多于晶硅，需求增长确定性较强。
- 与晶硅电池相比，薄膜电池的核心技术掌握在生产商而非设备商手中，这一方面制约了薄膜电池行业的发展速度，另一方面也为企业构筑起宽阔的护城河，行业格局非常稳定。晶硅电池 20 年的发展历程里尚未出现有持续竞争优势的龙头企业，薄膜电池则有机会成长出长期的行业巨头。
- 在当前的各类薄膜电池技术中，CdTe 电池具备最高的性价比。通过提高电池效率、加快生产节拍以及升级规格尺寸，最新型号的 CdTe 电池生产成本已降至 20 美分/W 以下，比一体化的晶硅电池成本低 10% 左右，并且仍有下降空间。此外，CdTe 电池的核心技术完全由电池企业掌握，而且其成本下降主要通过技术提升而不是大量的资本投入，因此 CdTe 电池是一个极其鲜明的先发优势行业，目前美国的 First Solar 独享 99% 以上的全球市场份额，国内龙焱能源是唯一一家可以批量生产 CdTe 电池的企业，并在 BIPV 市场上地位稳固，这类龙头值得长期看好。
- 钙钛矿电池于近年来兴起，理论成本远低于目前主流技术，但现在还面临着稳定性以及量产路线等问题。钙钛矿电池目前仍处于商业化早期，预计小批量阶段其生产成本有望降至 1 元/W 以下。但由于钙钛矿电池的物料要求和技术壁垒都低于其他电池路线，我们认为同时具备强大研发能力和工业设计能力的企业胜出概率更高，例如金风科技领投的牛津光伏（Oxford PV）已经与电池设备龙头梅耶博格合作，计划在 2021 年前实现钙钛矿电池产业化。

投资建议与投资标的

薄膜电池经过多年技术积累，目前 CdTe 电池和钙钛矿电池的成本已经有较强竞争力。我们认为由于薄膜电池行业天然的高技术壁垒和非标特性，其对晶硅电池的替代或者颠覆将是一个漫长的过程，但在细分领域里的领军企业具备长期的成长性。

- CdTe 技术建议关注全球最大的薄膜电池企业 First Solar (FSLR) 以及国内唯一实现 CdTe 组件量产的龙焱能源科技（未上市）；钙钛矿技术建议关注全球研发和工业设计能力最强的牛津光伏，国内风机龙头金风科技(002202, 买入)是其最大股东之一，协鑫纳米的主要关联公司保利协鑫 (3800.HK, 未评级) 以及纤纳科技（未上市）。

风险提示

- 碲化镉电池降本不及预期
- 钙钛矿电池产业化进程低于预期

行业评级

看好 中性 看淡 (维持)

国家/地区

中国/A 股

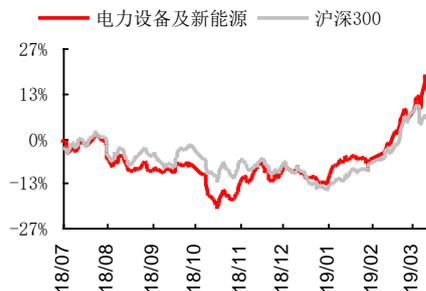
行业

电力设备及新能源

报告发布日期

2019 年 07 月 01 日

行业表现



资料来源：WIND

证券分析师

彭海涛

021-63325888-5098

penghaitao@orientsec.com.cn

执业证书编号：S0860519010001

联系人

郑浩

zhenghao@orientsec.com.cn

相关报告

从 SNEC 展会看光伏技术发展趋势	2019-06-11
光伏产业研究系列报告（4）：电池——从新兴到成熟，行业属性迎来历史性一跃	2019-03-27
光伏产业研究系列报告（3）：2019 年展望——走过坎坷，走进曙色	2019-01-14
光伏产业研究系列报告（2）：硅片——路线之争尘埃落定，巨头厮杀仍将持续	2018-12-21
光伏产业研究系列报告（1）：多晶硅行业——走进新时代，国产硅企夺取竞争优势	2018-11-04

东方证券股份有限公司经相关主管机关核准具备证券投资咨询业务资格，据此开展发布证券研究报告业务。

东方证券股份有限公司及其关联机构在法律许可的范围内正在或将要与本研究报告所分析的企业发展业务关系。因此，投资者应当考虑到本公司可能存在对报告的客观性产生影响的利益冲突，不应视本证券研究报告为作出投资决策的唯一因素。

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

目 录

薄膜太阳能电池：自成体系、技术壁垒高	7
简介：光吸收能力远胜晶硅，技术路线多种多样	7
潜在优势：低生产成本&多应用场景	8
技术分类：二代技术看碲化镉，三代钙钛矿潜力大	10
发展历程：潮落潮又起，份额企稳有望反弹	11
碲化镉电池：雄心勃勃的挑战者	13
简介：产业化进展最快，行业龙头已确立绝对优势	13
性价比分析：成本优势反复易手，高壁垒是双刃剑	15
制备流程：产线高度集约，沉积方案是核心环节	15
成本对比：不充分竞争浪费 CdTe 电池降本潜力	16
成本分析：“更高（效）、更大（尺寸）、更快（节拍）”是降本密钥	18
定价&利润率：发电量优势难掩效率短板，标准组件盈利能力依然受限	20
市场前景：传统市场份额迎来拐点，BIPV 值得期待	21
竞争格局：从千帆竞发到一枝独秀，高壁垒铸就优格局	23
First Solar：CdTe 电池领军者，蓄力五年再启扩张之路	23
龙焱能源科技：立足 BIPV 市场，先强后大稳步发展	24
Calyxo：重要订单被取消，规模扩张遇困境	25
质疑：技术、原料、Cd 污染	26
钙钛矿电池：冉冉兴起的超新星	27
简介：钙钛矿是个什么矿？	27
技术路线：单结&叠层并行不悖，适用多元应用场景	29
器件结构：正反向不分高下，多层介孔结构稳定性突出	29
前进方向：挑战晶硅 OR 携手共进	30
性价比分析：成本优势突出，稳定性问题待解决	31
生产流程：原材料成本低廉，可采用液相法生产	31
成本解析：封装、电极构成成本主体，工艺优化是降本必由之路	32
商业化的三道关卡：稳定性、大面积工艺和铅污染	33
稳定性—十年寿命是进入门槛	34
薄膜沉积工艺—对成本有决定性的影响	35
铅污染—看似无解，其实可控	35
代表企业：产业化道路仍在探索，绑定优质设备商或是关键	36
牛津光伏：金风科技领投的钙钛矿领航者，绑定梅耶博格聚焦叠层电池	37

苏州协鑫/厦门惟华：国内钙钛矿产业化先驱，背靠协鑫实力不容小觑	38
纤纳光电：钙钛矿电池超新星，获得三峡资本强力支持	39
总结：份额止跌回升，长期内有望走出超级巨头.....	39
份额：First Solar 扩产计划明确，钙钛矿公司跃跃欲试.....	40
未来走势：碲化镉行业先发优势突出，钙钛矿想象空间无限.....	40
投资建议：碲化镉看龙头，钙钛矿观变化	41
风险提示.....	42

图表目录

图表 1：太阳能电池分类	7
图表 2：薄膜电池活性材料吸光能力远高于晶体硅（c-Si）	8
图表 3：近 30 年来三种薄膜电池能量转换效率提升历史	8
图表 4：碲化镉电池的产业链更短	8
图表 5：同样装机量薄膜组件发电量更高	9
图表 6：薄膜组件温度系数更低，更适合炎热地区	9
图表 7：晶硅组件主要用于光伏集成建筑（BAPV）	9
图表 8：薄膜光伏组件更适用于光伏一体化建筑（BIPV）	9
图表 9：太阳能电池分类	10
图表 10：钙钛矿电池效率提升速度远远超过其他技术路线	11
图表 11：薄膜电池份额历史变化趋势统计	12
图表 12：2000 年三类薄膜电池产量及份额统计	12
图表 13：2008 年三类薄膜电池产量及份额统计	12
图表 14：2000 年以来薄膜电池份额变化趋势统计	13
图表 15：CdTe 电池能量转换效率提升情况统计	14
图表 16：碲化镉薄膜电池结构	15
图表 17：CdTe 组件出货量统计	15
图表 18：2018 年三家 CdTe 组件企业出货量估计	15
图表 19：碲化镉薄膜太阳能电池生产工艺流程图	16
图表 20：First Solar 碲化镉组件产线	16
图表 21：CdTe 薄膜主要沉积技术及代表企业	16
图表 22：CdTe 组件与晶硅组件成本变动趋势	17
图表 23：2004 年以来 First Solar 电池效率提升 1 倍以上	17
图表 24：First Solar 电池降本速度远快于组件降本	17
图表 25：2011 年以来晶硅光伏产业链上降价幅度普遍超过 80%	18
图表 26：一条 40MWCdTe 电池产线主要参数	18
图表 27：CdTe 组件成本明细	18
图表 28：CdTe 组件生产成本相关要素敏感性分析	19
图表 29：CdTe 薄膜组件面积增加将带动电池成本快速下降	20
图表 30：全球各区域当前组件价格（\$/W）	21
图表 31：碲化镉成本效率与晶硅比较	21
图表 32：建筑光伏一体化不同类型	21
图表 33：2018-2028 年 BIPV 市场复合增速有望超过 30%	22
图表 34：晶硅组件玻璃幕墙室内效果	23

图表 35: 薄膜幕墙室外效果	23
图表 36: First Solar 上市以来营收及毛利率情况统计	24
图表 37: First Solar 研发成果路线图	24
图表 38: First Solar 上市以来营收及毛利率情况统计	24
图表 39: First Solar 上市以来资本开支情况统计	24
图表 40: 龙焱能源 CdTe 电池产业技术水平稳步提升	25
图表 41: 碲产量（吨）总体呈增加趋势	26
图表 42: 碲矿价格（元/kg）近年来处于低位	26
图表 43: 太阳能电池组件和其他能源的镉排放比较图	27
图表 44: 硅电池和碲化镉电池重金属排放比较图	27
图表 45: 2005-2018 年钙钛矿电池具有里程碑意义的研究进展统计	27
图表 46: 典型的钙钛矿晶体结构（左）和钙钛矿电池（右）活性材料空间结构	28
图表 47: 一种典型的钙钛矿薄膜电池结构	28
图表 48: 钙钛矿电池效率提升速度显著高于主流技术	28
图表 49: 钙钛矿电池的典型结构，a) 介孔结构，b) n-i-p 平面结构，c) p-i-n 平面结构（d）双层平面异质结结构	29
图表 50: 各类钙钛矿电池结构极其代表器件转换效率	29
图表 51: 苏州协鑫生产的 71x41 小组件	30
图表 52: 苏州协鑫 100MW 钙钛矿组件成本拆分	30
图表 53: 晶体硅/钙钛矿叠层电池大幅提升太阳光利用水平	31
图表 54: 一种钙钛矿/晶硅叠层电池结构	31
图表 55: 钙钛矿组件（0.72m ² ）原材料成本明细	31
图表 56: 钙钛矿材料及组件生产流程	32
图表 57: 一条 45MW 钙钛矿电池产线主要参数	32
图表 58: 钙钛矿组件成本明细	32
图表 59: 电池效率提升能够显著降低钙钛矿组件成本	33
图表 60: 组件尺寸增大能够有效降低钙钛矿组件成本	33
图表 61: 某三类资源区典型项目参数	34
图表 62: 不同组件效率下钙钛矿光伏系统成本明细	34
图表 63: 钙钛矿组件寿命超过 10 年即能实现与晶硅同等 LCOE	34
图表 64: 目前主要的钙钛矿层沉积工艺及其研究成果	35
图表 65: 晶体硅/钙钛矿叠层电池大幅提升太阳光利用水平	36
图表 66: 一种钙钛矿/晶硅叠层电池结构	36
图表 67: 目前全球进展较快的钙钛矿企业情况简介	36
图表 68: 牛津光伏公司发展历程	37
图表 69: 梅耶博格计划推出的 HIT/钙钛矿叠层电池结构	38

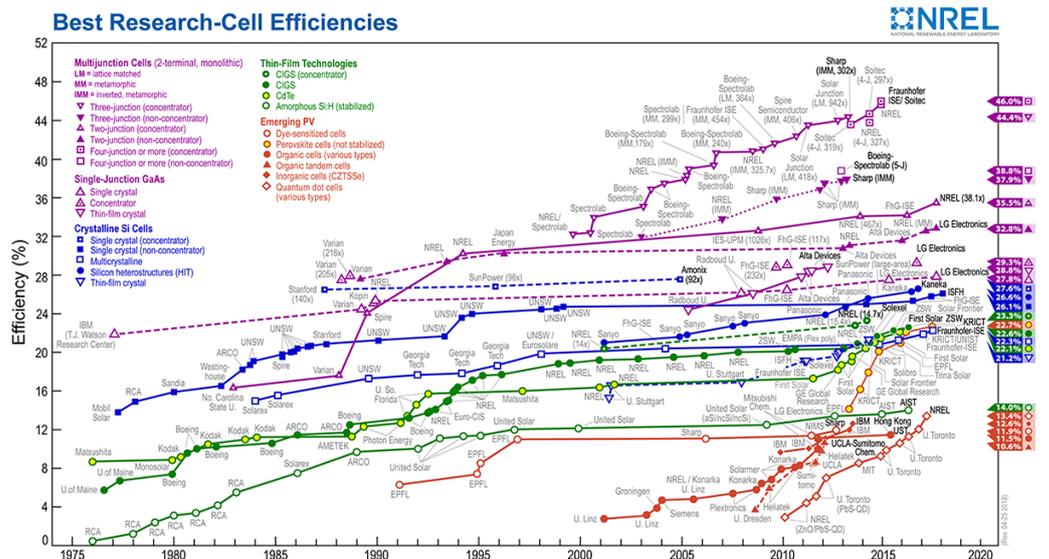
图表 70：牛津光伏叠层电池的认证效率高达 28%.....	38
图表 71：协鑫纳米生产的单结钙钛矿试验组件	39
图表 72：协鑫纳米试验中的晶硅+钙钛矿叠层组件	39
图表 73：纤纳科技制备的钙钛矿小组件效率连续打破世界纪录	39
图表 74：纤纳科技创始人展示公司钙钛矿组件产品	39

薄膜太阳能电池：自成体系、技术壁垒高

简介：光吸收能力远胜晶硅，技术路线多种多样

薄膜太阳能电池是光伏电池的一种形态。薄膜太阳能电池是在玻璃、不锈钢或塑料衬底上附上非常薄的感光材料制成，尽管效率仍低于晶硅电池，但由于活性层用量少，薄膜电池有望实现更低的生产成本。当前主流的晶硅电池活性层约 180~200 μm ，而薄膜电池活性层的厚度仅有 1~2 μm 左右，并且可以做成柔性组件，应用场景更加广泛。最早的薄膜电池于 1970s 问世，当时使用的活性材料是非晶硅（a-Si），经过 40 多年的发展，薄膜电池目前的年出货量也达到 GW 量级，成为光伏市场的重要补充。

图表 1：太阳能电池分类

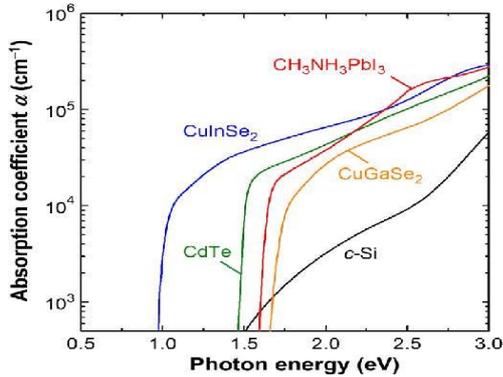


资料来源：NREL，东方证券研究所

薄膜电池活性层很薄的主要原因是其活性材料的吸光能力强。按照材料学分类，晶体硅属于间接带隙半导体，吸光度仅有 $10^3/\text{cm}$ ，薄膜电池的活性材料几乎全部是直接带隙半导体，其吸光能力较晶体硅高出至少 2 个数量级，吸光能力最强的 CIGS 甚至高达 $5\sim 6 \times 10^5/\text{cm}$ ，因此薄膜电池的活性材料用量仅有晶硅的 1% 左右，即可实现近乎相同的光吸收能力。

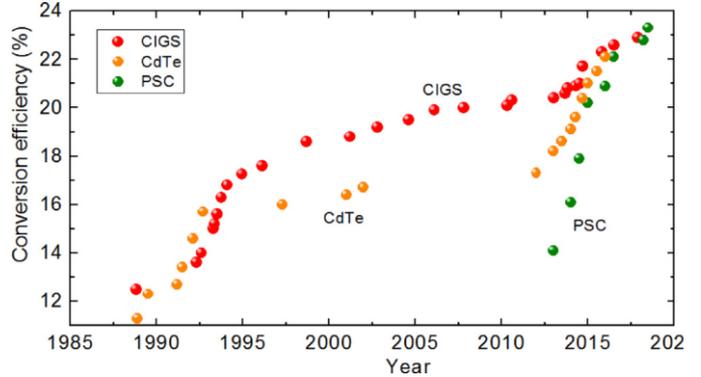
目前薄膜电池已发展出十几种技术路线，其中发展势头最好的有碲化镉（CdTe）、铜铟镓硒（CIGS）、染料敏化电池和非晶硅电池。根据 NREL 的最新统计，上述几种电池的实验室最高转换效率已达到 22.1%、22.7%、14% 和 20.8%。作为对比，晶硅电池实验室的最高效率为 26.3%。目前 CdTe、CIGS 和非晶硅电池均已实现产业化，染料敏化电池的进程相对落后。值得一提的是，近年来钙钛矿电池（Perovskite Solar Cell, PSC）异军突起，作为一种问世仅 10 年的新路线，其最新成果已达 24.2%，发展速度远远超过其他电池，已经成为光伏电池研究领域最闪亮的明星。

图表 2：薄膜电池活性材料吸光能力远高于晶体硅（c-Si）



资料来源：Applied Physics Reviews, 东方证券研究所

图表 3：近 30 年来三种薄膜电池能量转换效率提升历史



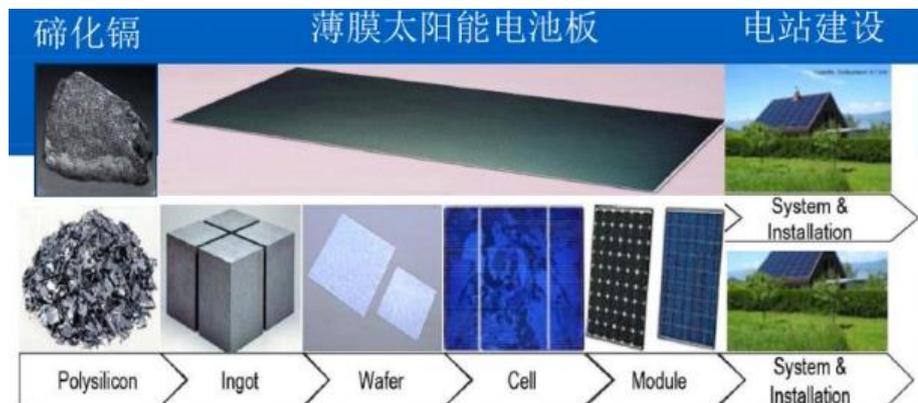
资料来源：Applied Physics Reviews, 东方证券研究所

潜在优势：低生产成本&多应用场景

从已经取得的成果来看，薄膜电池的能量转换效率略逊于晶硅电池，但薄膜电池具备很多独特的优点，因而得以在激烈的竞争中保有一席之地。成本方面，2012 年以前，First Solar 为代表的薄膜电池曾长期占据优势，其性价比主要建立在如下方面：

- 节约活性材料。**由于薄膜材料光吸收系数大，电池厚度可极薄。如使用晶体硅，要充分吸收太阳光，需要的厚度为 180 μm ，而使用非晶硅，只要 1 μm 就足够，并且不需要像晶硅那样切片，材料浪费极少。过去十几年中，晶硅电池的硅耗持续快速下降，但现在仍达 3.5g/W 以上，预计还能有 1/3 左右的下降空间；薄膜电池的硅耗相对要低得多，如 CdTe 活性材料的用量仅为 0.2g/W，并且随着效率提高仍有较大的摊薄空间；钙钛矿电池的活性材料消耗仅为 0.3mg/W，活性材料成本节约达 90%。
- 生产流程少，产业链短。**与晶硅电池相比，薄膜电池的产线非常集约，晶硅电池的产业链包括多晶硅-硅片-电池片-组件四大环节，除组件外其他三大环节均为重资本投入，每 GW 的资本开支达十亿元人民币以上，且生产流程非常复杂。薄膜电池的功能层通常采用等离子体增强型化学气相沉积（PECVD）法、磁控溅射等方法沉积，**生产自动化程度高，制作工艺可以连续在多个真空沉积室或多片在一个沉积室内完成，从而实现大批量生产**，尽管目前薄膜电池单 GW 产能投资高于晶体硅，但在规模化生产之后投资有望快速下降。

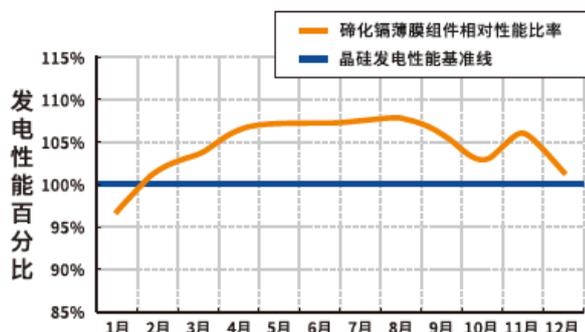
图表 4：碲化镉电池的产业链更短



资料来源：美国新泽西理工学院, 东方证券研究所

- **薄膜电池还具有弱光效应好、温度系数低等特点，同等装机容量下生命周期发电量更多。**比如在欧洲地区，由于光照资源普遍较差，碲化镉薄膜电池发电能力更强，同样装机量发电量比晶硅多发 5.4% 以上的电能；此外，由于碲化镉薄膜电池温度系数比晶硅低，当组件发热时发电量也会更多，而在光照资源充裕的地区，组件温度上升到 60℃ 以上是非常正常的。优越的弱光性和温度系数表现一定程度上弥补了发光效率相对较低的不足。

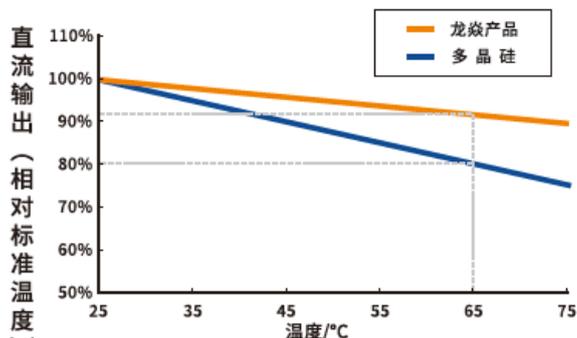
图表 5：同样装机量薄膜组件发电量更高



88个项目中薄膜组件和晶硅组件的发电性能对比

资料来源：龙焱科技，东方证券研究所

图表 6：薄膜组件温度系数更低，更适合炎热地区



不同温度下发电性能对比

资料来源：龙焱科技，东方证券研究所

除了上述优势，薄膜电池多元的应用场景意味着更广阔的潜在市场空间。薄膜电池可以按照传统工艺制成刚性的标准组件，用于地面电站或者分布式电站；也可以根据需求以不锈钢或聚合物等柔性基底为衬底，生产柔性电池，适用于建筑物曲面屋顶等处使用；还可以做成折叠式电源，方便携带，可供给小型仪器、计算机、军事、通信、GPS 等领域的移动设备使用。

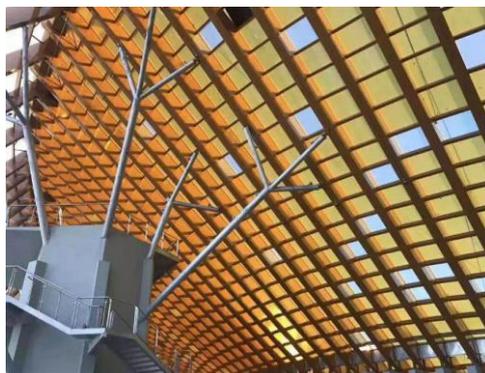
薄膜电池最具想象空间的应用场景在光伏建筑一体化（BIPV）市场。随着技术的发展，人们对于光伏产品的要求不仅仅是发电，还包括其他衍生需求。比如在 BIPV 市场，客户要求安装的光伏组件要美观和透光，而晶硅电池表面自带栅线，颜色不均匀，硅材料也不透光，难以满足客户需求；另外，现代建筑经常出现弧面等不规则形状，晶硅韧性较差，而且都是标准尺寸，而薄膜电池可以加工成任意形状，实现定制化柔性加工，是这一百亿级市场的绝佳候选。

图表 7：晶硅组件主要用于光伏集成建筑（BAPV）



资料来源：网络资料，东方证券研究所

图表 8：薄膜光伏组件更适用于光伏一体化建筑（BIPV）



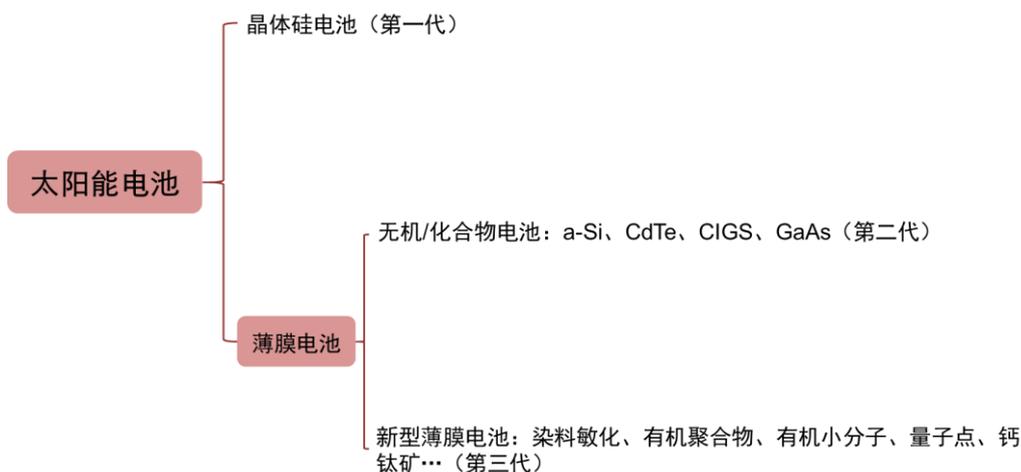
资料来源：网络资料，东方证券研究所

技术分类：二代技术看碲化镉，三代钙钛矿潜力大

从光伏电池的发展历程来看，产业界通常将光伏电池分为三代。**第一代电池即当前主流的硅基太阳能电池，主要包括单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池**，硅基电池产业链成熟，是目前光伏市场的主流产品，市占率在 90%-95%，我们曾有报告对其进行深入讨论，在此不再赘述。

第二代电池主要是无机化合物薄膜太阳能电池，主要包括非晶硅（a-Si）、铜铟镓硒（CIGS）、碲化镉（CdTe）和砷化镓（GaAs）等。第三代电池主要从 1990s 后开始兴起，也被称为**新兴太阳电池（Emerging Solar Cells）**，囊括了当前学术领域各类新兴技术，包括钙钛矿、染料敏化、有机太阳电池、量子点电池等。第三代电池在形态上也属于薄膜电池，只不过发展时间更短，尚未实现产业化。

图表 9：太阳能电池分类



资料来源：东方证券研究所整理

非晶硅薄膜电池是二代电池中最早实现产业化的技术，其生产工艺相对成熟，成本也比较低。但非晶硅电池存在两大弱点：**第一是效率低**，从材料本身特性而言，非晶硅薄膜的能带值在 1.7eV 附近，尽管光吸收系数高（ $\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ），但短波长的光能完全无法利用，因此在电池效率上，非晶不如多晶，多晶不如单晶，这是客观规律，无法突破。**第二是吸收层材料的本征衰退而造成的组件衰退达 15%（多结）-25%（单结）**，这是因为 a-Si 的无定形态是一种短程有序结构，体内存在大量的悬挂键，使电荷载流子的传输距离短而且复合严重。虽然氢钝化非晶硅（a-Si:H）可以减少悬空键密度几个数量级，改善少数载流子扩散长度，但仍然存在严重的光致衰退效应（Staebler-Wronski, S-W），稳定性差。目前硅薄膜太阳能电池的最高转换效率较低（a-Si：10.2%， $\mu\text{c-Si}$ ：11.9%），市场处于萎缩状态。在光伏市场上，非晶硅薄膜电池已经难以具备很强的竞争力。

碲化镉是目前为止商业化最成功的薄膜电池。CdTe 材料带隙宽度约 1.5eV，与太阳光谱更匹配，其理论效率达 32%，高于晶硅，降本潜力也很大。目前碲化镉电池的实验室效率已达 22.1%，商业化组件效率达到 18%，成本可与晶硅产品抗衡。此外，CdTe 电池可以便捷地与建筑材料结合用于 BIPV 市场。鉴于以上优点，碲化镉电池的产能仍然处于扩张阶段，我们认为 CdTe 电池是未来几年发展前景最明确的薄膜电池技术，在后续章节将重点介绍。

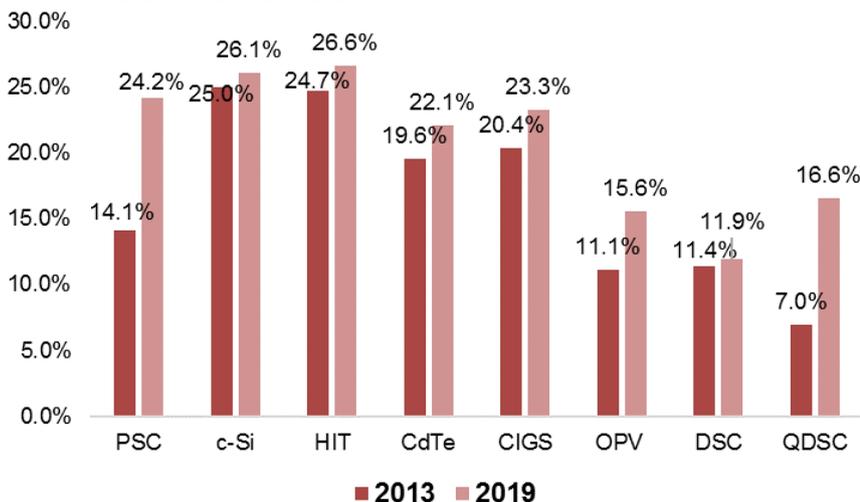
CIGS 电池产业化也较早，但由于 1) 路线技术难度较高（四种元素配比复杂），2) 原料金属比较稀少而且价格高（In 元素储量有限），3) 核心设备未国产化等原因，目前的商业化进程比较缓慢。尽管有统计数字指出 CIGS 电池年产量已达 2GW，但并未见到大企业的出货数据。我们认为，由于其极高的技术难度以及受限的原材料供应，短期内 CIGS 的大规模商业化仍然面临较大困难。

砷化镓（GaAs） 薄膜电池效率最高，但由于价格昂贵，基本只用于军事和太空等领域，民用化应用已经停歇，未来商业化的可能性也很低。

第二代薄膜电池在科研领域的突破主要发生在 20 世纪七八十年代，进入 1990s 之后，以染料敏化电池、有机聚合物太阳能电池、量子点电池为代表的新型电池如雨后春笋般涌现，在这些新兴技术中，钙钛矿电池的产业化前景相对可观。

效率方面钙钛矿的提升速度远远超过其他技术。根据 NREL 数据，2013 年首次统计的钙钛矿电池效率记录为 14.1%，而当前已达 24.2%，同期传统晶硅电池效率从约 25.0% 提升至 26.1%，HIT 电池从 24.7% 提升至 26.6%，其他 CdTe、CIGS 以及有机电池等薄膜技术进步速度都大幅落后；组件上，杭州纤纳科技钙钛矿小组件效率在 16 个月内从 15.3% 提升至 17.9%，提升速度同样惊人。

图表 10：钙钛矿电池效率提升速度远远超过其他技术路线



资料来源：NREL，东方证券研究所

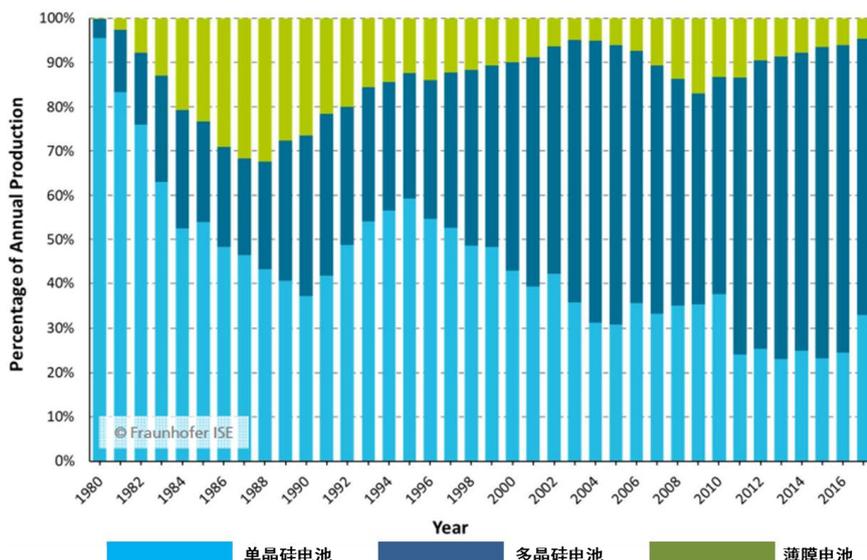
注：PSC-钙钛矿电池；c-Si-晶硅电池；HIT-硅基异质结电池；CdTe-碲化镉；CIGS-铜铟镓硒；OPV-有机聚合物电池；DSC-染料敏化电池；QDSC-量子点电池

成本方面，目前钙钛矿组件的成本并无权威数据，但从技术路线分析，其量产后的组件成本大概率低于 1 元/W，约为当前晶硅组件的 50%-65%。虽然由于稳定性较差以及工艺路线未确定，量产仍需时日，但随着封装技术和材料性能的提升，成本未来进一步下降的潜力仍然很大。

发展历程：潮落潮又起，份额企稳有望反弹

商用薄膜电池的发展历程在历史上经历了几轮周期。1980 年代由于硅基薄膜电池的兴起带动薄膜电池市场份额一度超过 30%，但随着硅基薄膜遇到瓶颈，1990 年代里薄膜电池的总份额持续滑落，2004 年之后 First Solar 推动 CdTe 电池快速产业化，将市场份额再度推升至 15% 以上，随后由于多晶硅价格的崩盘大幅降低晶硅电池成本，近年来薄膜电池的份额再度萎缩。

图表 11：薄膜电池份额历史变化趋势统计

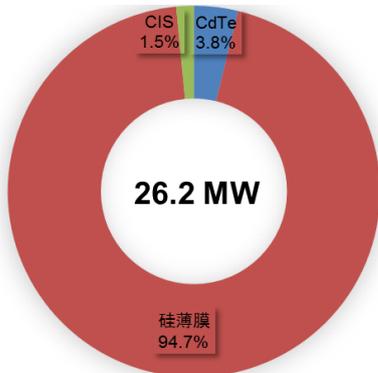


资料来源：Fraunhofer ISE，东方证券研究所

2000 年之前全球光伏市场总体规模较小，我们着重回顾最近 20 年薄膜电池的发展历程。2000 年时，薄膜电池的主体仍然是非晶硅薄膜电池，据统计，2000 年全球薄膜电池总产量仅有 26MW 左右，其中非晶硅薄膜电池的占比达到 95%。这主要是因为非晶硅薄膜电池的技术比较成熟，早在 20 世纪 90 年代就已实现商业化，随后美国、日本以及国内的电池企业纷纷重点扩张非晶硅电池产能，到 2008 年非晶硅电池的总产量已超过 400MW，较 2000 年增长近 15 倍。

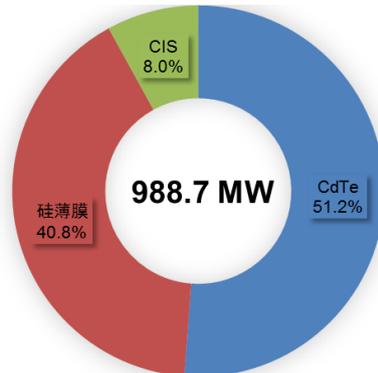
增长更快的是 CdTe 电池。2004 年 First Solar 实现了低成本 CdTe 电池的量产，开启了快速扩张的步伐，到 2008 年 CdTe 电池的产量已超过 500MW，成为产量最大的薄膜电池技术，其中 First Solar 一家的产量占总产量的 99% 以上。由于当时多晶硅价格仍处在创纪录的高位，CdTe 电池的成本优势突出，First solar 快速扩张产能，2009 年产量达到 1.1GW，成为当年的电池产量冠军，全球市占率高达 12%。在 CdTe 的带动下，CI(G)S 也成为了薄膜产业化的热点，但由于组分过于复杂，尽管 CIGS 取得了很高的实验室转换效率，但产业化进程始终不顺，产量迟迟未能突破。

图表 12：2000 年三类薄膜电池产量及份额统计



资料来源：中国知网，东方证券研究所

图表 13：2008 年三类薄膜电池产量及份额统计

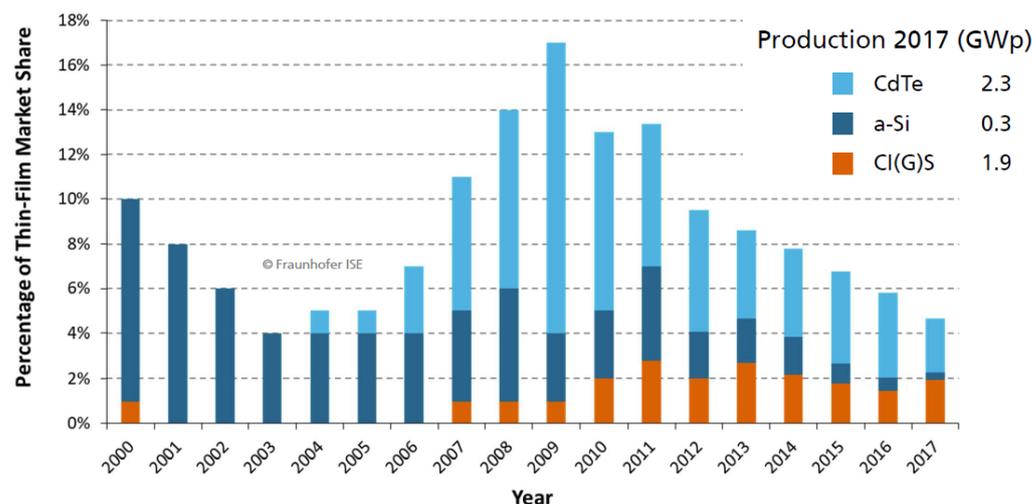


资料来源：中国知网，东方证券研究所

2009 年薄膜电池的份额达到新千年的顶峰，随后开始逐步下降，根据下降原因不同又分为 2 个阶段：**2010 和 2011 年为第一阶段，期间市场份额的下滑主要源自薄膜电池产量增加的速度落后于光伏市场的总体增速**，由于非晶硅电池遭遇瓶颈，CIGS 未能实现量产，在此期间产量的增加主要来自 First Solar，2011 年 First Solar 的电池产量较 2009 年增加近 1 倍，但当年全球光伏总装机量达到 30GW，较 2009 年增加近 4 倍，因此薄膜电池份额反而有所下降；**2012 年之后为第二阶段，这期间份额的下降是由于薄膜电池成本优势丧失**，First Solar 在 2012 年之前其电池成本大幅低于晶硅电池，毛利率持续在高位，但随着多晶硅价格在 2012 年历史性地跌到 20 美元/kg 以下，晶硅电池的成本一年内下降了 40%，导致 First Solar 丧失了成本优势，随后几年公司将业务重心转向 EPC，产能扩张停滞，因此薄膜电池的市场份额逐渐萎缩至 5% 以下。

我们认为薄膜电池的市场份额有望触底反弹，反弹的主要动力来自 CdTe 电池开启新一轮产能扩张。由于成本增速低于晶硅电池，从 2012 年起，First Solar 的电池产量就维持在 2GW 左右，几乎没有增长，但随着新的 S6 大型组件的推出，CdTe 电池的成本有望降至 20 美分/W 以下，重新夺回成本优势，因此 First Solar 重启扩张脚步。据披露，2018-2020 年 First Solar 的出货量预计分别为 2.7/5.6/8GW，薄膜电池的份额有望止跌反弹。此外，近年来钙钛矿电池快速兴起，有望在 3-5 年内实现产业化，成为推动薄膜电池份额提升的新动力。

图表 14：2000 年以来薄膜电池份额变化趋势统计



资料来源：Fraunhofer ISE，东方证券研究所

碲化镉电池：雄心勃勃的挑战者

简介：产业化进展最快，行业龙头已确立绝对优势

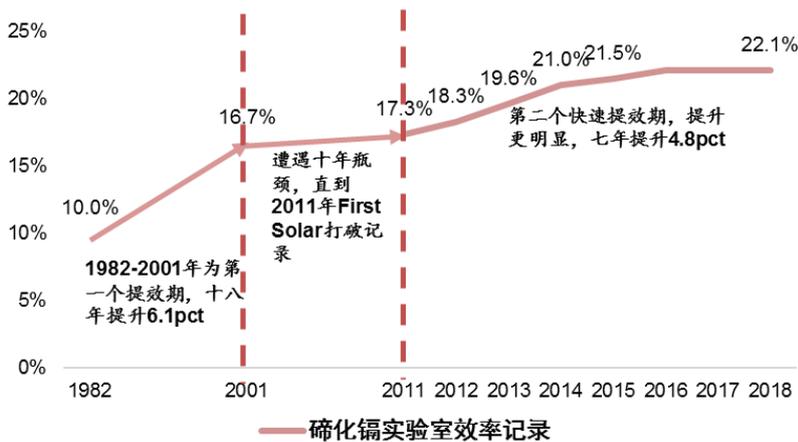
碲化镉 (CdTe) 薄膜太阳能电池是一种以 P 型 CdTe 半导体为吸光层材料的太阳能电池。CdTe 材料性能优越，为直接带隙半导体，禁带宽度约为 1.45 eV，接近最佳带隙宽度 (1.4eV)，理论效率极限达 32%，较晶硅电池高 3 个百分点，且具有较高的光吸收系数，可见光范围内高达 10^5cm^{-1} ，2 μm 厚度的 CdTe 吸收层能够吸收 99% 的能量高于 CdTe 禁带宽度的光子。

1963 年，Cusano 研制出了以碲化镉为 N 型和以碲化亚铜为 P 型结构的电池，其光电转化效率达到 7%，成为碲化镉薄膜电池的开端。1982 年，Kodar 实验室引入 N 型 CdS 作为 CdTe 电池的窗

口层，制备出效率超过 10% 的 CdTe 薄膜电池，这是现在产业化 CdTe 薄膜太阳能电池的原型。以 N-CdS/P-CdTe 异质结为基础的 CdTe 薄膜电池，经过很长一段时间的的发展，于 2001 年获得 16.7% 的转换效率，此电池由美国可再生能源实验室（NREL）吴选之教授等人研制，他们使用了 CdSnO₄/ZnSnO₄ 复合薄膜层取代传统的 ITO 作为电池的前电极。该电池效率记录一直保持了约 10 年，直到 2011 年美国 First Solar 公司才制备出转换效率为 17.3% 的 CdTe 电池。近年来，由于采用宽禁带材料取代传统的 CdS 作为电池窗口层，CdTe 电池转换效率记录不断被刷新。目前 CdTe 薄膜电池的最高效率为 22.1%，由 First Solar 公司在 2016 年创造。

CdTe 薄膜太阳电池通常由五层功能性薄膜构成，分别为：1) 透明导电氧化物（Transparent Conductive Oxide, TCO）薄膜，主要起到透光和导电的作用，CdTe 太阳电池主要使用 FTO 作为透明导电薄膜层；2) N 型 CdS 窗口层，主要与 P 型 CdTe 形成异质结，光照条件下，产生光伏效应；3) P 型 CdTe 吸光层，整个电池的最核心的部分，光生载流子的产生、输运主要在该层进行；4) 背接触层，该层主要降低 CdTe 和金属电极的接触势垒，减少背接触处载流子的复合几率；5) 背电极，通常为金属薄膜，主要作用是收集空穴，连接外电路。CdTe 电池工作时，太阳光依次穿过玻璃衬底、氧化物导电薄膜和 CdS 窗口层后，在 P 型 CdTe 吸收层内被吸收，产生电子-空穴对，在 N-CdS/P-CdTe 异质结内建电场的作用下，电子向前电极（负极）输运，空穴向背电极（正极）输运，正负极之间接入负载，即可完成光电转换和电能输运过程。

图表 15：CdTe 电池能量转换效率提升情况统计



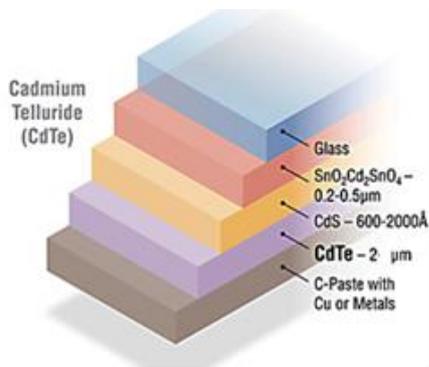
资料来源：李强博士论文《碲化镉薄膜太阳电池关键科学问题研究》，东方证券研究所

相较于传统的晶硅太阳电池，CdTe 薄膜电池有诸多优点：1) CdTe 吸收层具有较高的光吸收系数，厚度仅为几个微米的 CdTe 即可满足对太阳光的高效吸收；2) CdTe 薄膜电池的制备工艺简单，CdTe 容易沉积成大面积薄膜，沉积速率高，CdTe 薄膜的生长通常采用近空间升华法和气相输运沉积法，这两种方法技术简单、成熟、稳定，能极大降低生产成本；3) CdTe 太阳电池的温度系数比晶硅电池低 3% 左右，相同温度下，CdTe 太阳电池性能更加稳定；4) 潮湿天气下，CdTe 电池能量损失小于晶硅电池。此外，CdTe 薄膜电池采用上衬底结构，无电极遮挡光损失，CdTe 薄膜太阳电池可制备成柔性太阳电池，具有较广阔的应用前景。

CdTe 薄膜太阳电池市场份额远低于晶硅电池，尤其是 2012 年以来，由于晶硅电池成本大幅下降，以 First Solar 为首的薄膜电池企业控制扩产速度，出货量增速趋于停滞，份额持续萎缩。但近年

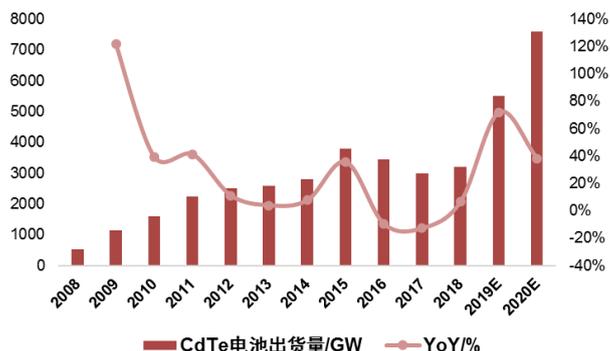
来随着新一代产品的成本大幅下降，CdTe 电池出货量有望迎来新一轮的高速成长期，2020 年出货量较 2018 年有望增加近 2 倍。

图表 16：碲化镉薄膜电池结构



资料来源：龙焱科技，东方证券研究所

图表 17：CdTe 组件出货量统计



资料来源：彭博，东方证券研究所

值得一提的是，由于技术壁垒极高，CdTe 电池行业的竞争格局十分清晰。目前碲化镉产业化的公司仅有三家，美国的 First Solar 是绝对霸主，占据几乎全部碲化镉组件的出货量；德国的 Calyxo 和中国的龙焱科技也分别有少量组件出货。从效率来看，First solar 也存在显著优势，不仅领衔实验室效率记录，量产效率也是明显优于竞争对手。因此，薄膜电池行业性的成长红利大概率会被少数企业充分攫取。

图表 18：2018 年三家 CdTe 组件企业出货量估计

公司	国家	2018 年出货量 (MW)	最新量产效率
First solar	美国	2700	17%-18.2%
Calyxo	德国	85+	14.3%
龙焱科技	中国	40	13-14%

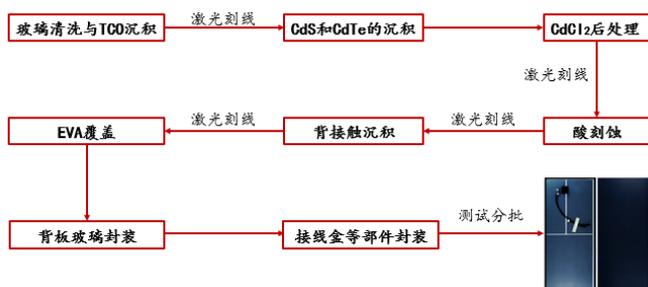
资料来源：First solar 年报，Calyxo 官网，龙焱官网，东方证券研究所

性价比分析：成本优势反复易手，高壁垒是双刃剑

制备流程：产线高度集约，沉积方案是核心环节

碲化镉组件制备流程短，加工总时长不超过 3 小时。碲化镉薄膜组件可分解为三个主要步骤：沉积、后处理和组装测试，并且可以在同一条产线上完成。其中沉积步骤又可分为各层的沉积，后处理主要指的是对沉积的薄膜进行一定的退火、腐蚀等处理，是提高器件性能不可或缺的一步；封装则是为了保证组件 25 年寿命。从一块玻璃进入产线到最后完整的组件，总时长只需 2-3 小时，每块组件的平均生产节拍可控制在 1 分钟以内。相比之下，晶硅产业链需要从多晶硅料-硅片-电池片-组件四个环节，每个环节又有多个步骤，相对繁琐。

图表 19：碲化镉薄膜太阳能电池生产工艺流程图



资料来源：成都中建材光电，东方证券研究所

图表 20：First Solar 碲化镉组件产线



资料来源：网络资料，东方证券研究所

沉积方案是核心环节，专利和技术是核心壁垒。三个步骤中，后处理和封装都大同小异，工艺难度和复杂性也不高；沉积工艺是核心工艺环节，也是决定最终组件性能最关键的一步。CdTe 薄膜的沉积技术有多种路线，包括气相运输沉积(VTD)、近距离升华(CSS)、常压物理气相沉积(APPVD)、溅射沉积、电镀沉积等十余种。**实践证明，气相运输沉积(VTD)技术和近距离升华(CSS)技术最适合于工业化生产。**其中，VTD 技术的主要特点是镀膜速度快，均匀性高，产量大，材料利用率高，无需更换原材料，技术独有性强，后续器件工艺与其他技术兼容；SS 技术的主要特点是：镀膜速度快，容易获得高效率产品，均匀性设计对热场设计依赖性强，原材料更换需要特别设计，主要技术公开，后续器件工艺与其他技术兼容。

从全球碲化镉薄膜太阳能电池制造商所在技术阵营看，美国 First Solar 公司是全球唯一一家采用气相运输沉积 (VTD) 技术的企业。VTD 技术是 First Solar 公司的专利技术，并严格禁止其他企业采用；近距离升华 (CSS) 技术由于技术公开，全球大部分企业都采用该项技术；常压物理气相沉积 (APPVD) 技术的专利拥有者则是美国俄亥俄州的 Solar Fields 公司及其子公司德国 Calyxo。

近年来不断有企业由于成本居高不下被迫退出，目前全球范围内有量产能力的 CdTe 电池企业仅有美国 First Solar、德国 Calyxo、中国的龙焱科技及中建材光电，其中能够大规模生产碲化镉 (CdTe) 薄膜光伏组件的企业只有美国 First Solar 一家，其产量约占全球总产量的 95% 以上。可见，碲化镉薄膜电池技术产业化并不是一件单纯的技术工作，而是一项综合性很强的系统工程，实现该技术的产业化有较大的难度。

图表 21：CdTe 薄膜主要沉积技术及代表企业

公司	工艺	特点
First solar	VTD	镀膜均匀性高，产量大，材料利用率高， 无需更换原材料，专利垄断
Calyxo	APPVD	专利垄断
龙焱科技	改良 CSS	镀膜速度快，均匀性设计对热场设计依赖性强， 原材料更换需要特别设计，专利公开

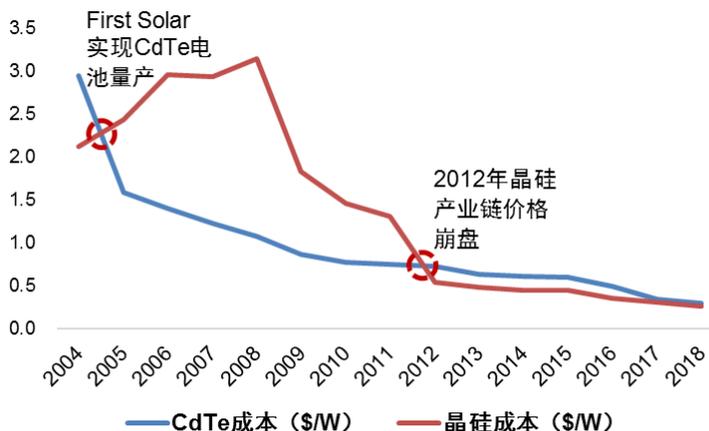
资料来源：Ofweek 光伏网，东方证券研究所

成本对比：不充分竞争浪费 CdTe 电池降本潜力

在相当长的一段时间里，碲化镉电池的成本低于晶硅。2004 年 First Solar 实现 CdTe 电池量产之后，成本快速下降，2005 年 CdTe 成本已降至晶硅组件的 2/3 左右，同时由于多晶硅价格持续暴涨，晶硅电池的价格居高不下，到了 2008 年，First Solar 的电池成本仅有晶硅电池的 1/3。这种

局面直到 2012 年才被改写，当年多晶硅价格从 80 美元/kg 暴跌至 20 美元/kg 以下，晶硅电池的成本再度领先，并保持至今。但随着 First Solar S6 系列大容量组件的推出，CdTe 电池的成本有望降到 20 美分/W 以下，从而再度具备一定的成本竞争力。

图表 22：CdTe 组件与晶硅组件成本变动趋势



资料来源：公司公告，东方证券研究所

注：2012 年前晶硅电池成本参考尚德电力数据，2013 年及以后参考晶科能源数据

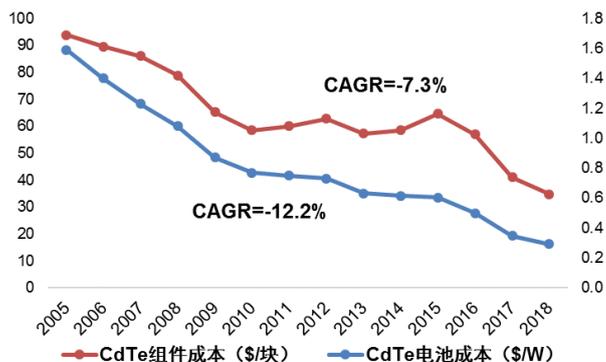
我们认为导致这种变化走向的原因如下：理论上，CdTe 电池的物料成本、生产流程成本都低于晶硅电池，其降本潜力也高于晶硅，但由于 CdTe 电池的技术壁垒过高，能够参与其中的企业数量极少，生产流程和供应链的标准化水平低，导致其降本潜力远远没有释放。到目前为止，First Solar 几乎是以一己之力与硅产业链上的成百上千家企业竞争，First Solar 经营稳健，2012 年之后几乎没有资本开支，而在既有产线上降本只能依靠组件效率的提升，2004 年以来，其标准的 1.2m x 0.6m 规格组件功率从 55W 提升至 119W，组件效率从 7.6% 提升至 16.5%。在效率提升的带动下，2005-2018 年间，First Solar 电池产品的成本从 1.59\$/W 降至 0.3\$/W 以下，降幅达 82%，13 年复合降速约 12.2%，单块组件成本则从 93.8\$/块降至 34.8\$/块，降幅约 63%，13 年复合降速约 7.3%。

图表 23：2004 年以来 First Solar 电池效率提升 1 倍以上



资料来源：公司公告，东方证券研究所

图表 24：First Solar 电池降本速度远快于组件降本

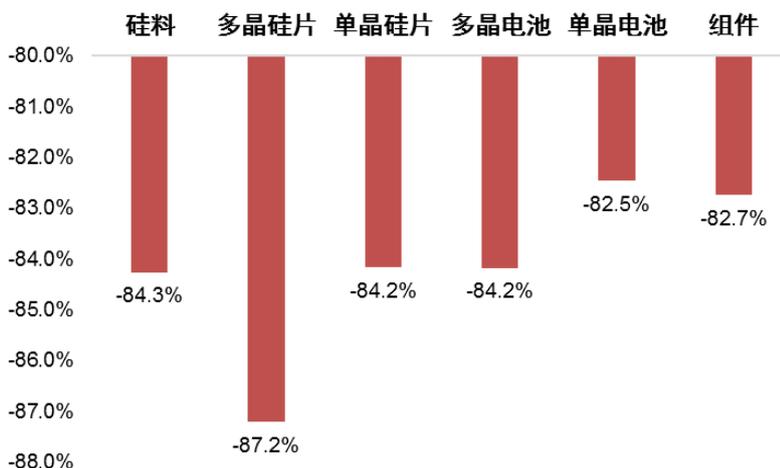


资料来源：公司公告，BNEF，东方证券研究所

与薄膜电池不同，晶硅电池主要通过高度的标准化迅速扩大规模，激烈的内部竞争进一步加速了成本的下降。据不完全统计，仅 2011 年 7 月份以来，晶硅产业链各环节降价幅度在 82.5~87% 之间，

复合降速 20%左右，远远快于 CdTe 电池。但是高度同质化带来的激烈竞争同时也严重摧残了行业的盈利能力，目前产业链多数环节的盈利能力都比较一般，而且利润率波动极大。

图表 25：2011 年以来晶硅光伏产业链上降价幅度普遍超过 80%



资料来源：Wind，东方证券研究所

成本分析：“更高（效）、更大（尺寸）、更快（节拍）”是降本秘钥

为进一步分析薄膜电池的成本结构和降本路径，我们构建了一条 40MW 产线的成本模型，由于目前 CdTe 产线仍然高度定制化，而且要用到比较昂贵的真空设备和激光切割设备，产线初始投资额较大，约 2 亿元/40MW，产线其他运营参数如下：

图表 26：一条 40MW CdTe 电池产线主要参数

生产节拍/s	60	小时产量（块）	60	生产小时数/h	22
日产量（块）	1320	年产量（块）	448800	转换效率/%	13.2%
规格（m ² ）	0.72	单块功率/W	95	年产能/MW	43

资料来源：Wind，东方证券研究所整理测算

我们测算的结果表明，CdTe 电池的成本已经可以做到 1.6 元/W，与高效单晶组件成本接近，但由于电池效率和组件输出功率较低，小产线上 CdTe 性价比仍低于晶硅产品。与晶硅电池的成本结构不同的是，CdTe 电池成本中折旧、封装等成本占比超过一半，而活性材料的占比很低，CdTe、CdS 等原材料成本仅有 0.1-0.2 元/W，晶硅组件中硅成本占比达 60%以上；这意味着 CdTe 电池成本还有巨大的下降空间。

图表 27：CdTe 组件成本明细

	成本（元/块）	单价	用量	成本（元/W）	占比/%
折旧	44.56	-	-	0.47	29.1%
导电玻璃	36.00	50 元/m ²	0.72m ²	0.38	23.5%
普通玻璃	10.80	15 元/m ²	0.72m ²	0.11	7.0%
原材料	11.42			0.12	7.4%
人工	15.60	10 万元/年	70 人	0.16	10.2%

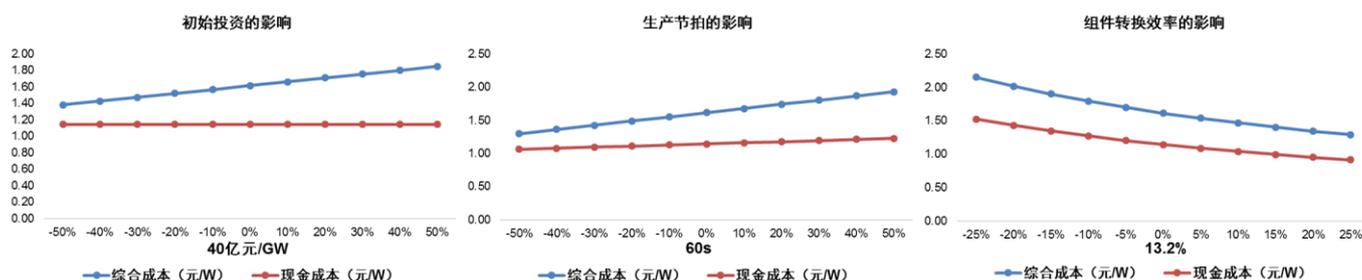
能源动力	15.00			0.16	9.8%
其他	20			0.21	13.0%
合计	153.38			1.61	

资料来源：东方证券研究所测算

根据该模型，对影响成本的各项因素做敏感性分析，在不考虑物料成本和人工成本下降空间的情况下，电池成本最敏感的因素主要是产能投资、生产节拍和能量转换效率。

设备投资方面，CdTe 电池产线上用到真空镀膜、激光刻蚀等高端设备，而且由于规模较小，多为非标定制化生产，因此初始投资额较大。据了解，龙焱科技第一条产线用到的机器设备总计 40 台（套），投资额近 2 亿元人民币，因此在小批量生产情况下，电池成本中折旧占比高达 20-30%。随着 CdTe 电池的规模化生产，设备投资有巨大的下降空间。First Solar 最新的资本开支强度已降至 2.6 亿美元/GW，约合 1.8 元/W，只相当于小产线的 40%，考虑到国内产线还享有国产设备的低价红利，未来系统投资降本空间至少在 50%以上，折旧成本有望降至 0.2 元/W 以下，在产品成本中的占比有望降至 10%左右。

图表 28：CdTe 组件生产成本相关要素敏感性分析



资料来源：东方证券研究所测算

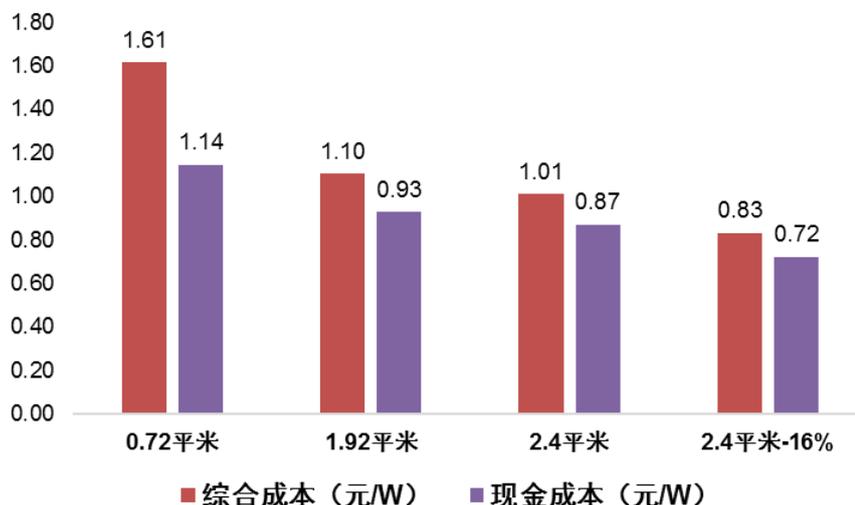
生产节拍提升能够有效提高产能利用率，降低折旧、人工、水电等各项成本。生产节拍主要取决于镀膜技术，First Solar 独有的 VTD 技术（气相运输沉积）仅需 40 秒不到即可制得质量极高的 CdTe 薄膜，而国内目前领先的生产节拍大约为每个组件 60s，在同样的能量转换效率下，这两种节拍下生产成本相差 0.2 元/W。

提高组件的能量转换效率是降本最有效的方式。据测算，如果组件的能量转换效率从 13.2% 的基准线上提升到 16.5%（First Solar 当前的水平），组件成本有望降至 1.3 元/W 以下，其中现金成本降至 0.9 元/W 左右。效率提升的制约因素仍然是技术工艺水平，随着薄膜面积的增大，针眼、晶界等缺陷增加会导致整体效率的下降，其改善仍依赖成膜技术的持续优化。

除了上述因素外，增大组件的尺寸规格也是降低成本极为有效的方案。目前 First Solar 和龙焱科技的主打产品规格依然是 1.2m x 0.6m，面积只有 60 型晶硅组件的 44%，随着组件成本在光伏系统总成本中的占比日益降低，在可接受的范围内增大组件面积是降低 BOS 成本的有效途径。与此同时，由于规模效应，在其他参数不变的情况下，组件尺寸每增加 1 倍，其他相关成本增加 85% 左右，因此组件成本也会显著下降。我们在模型里加入了一个修正因子，结果显示，当组件面积从 0.72m² 增加到 1.92m² 时，成本将下降 1/3，进一步增加到 2.4m² 时，组件成本有望降至 1 元/W 左右，如果再叠加效率的提升，CdTe 组件成本有望降至 0.8 元/W 左右。2017 年下半年起，First Solar

开始布局新的 S6 系列产品，S6 组件面积达到 2.45m²，功率最高达 445W，重量 35kg，据披露，S6 组件的生产成本有望降至 20 美分/W 以下，较 S4 产品低 30-40%。

图表 29：CdTe 薄膜组件面积增加将带动电池成本快速下降



资料来源：Wind，东方证券研究所

目前制约 CdTe 尺寸升级的因素主要来自两方面，一是高昂的设备投资，First Solar 目前在产的产能主要建于 2005-2008 年，与大组件规格不兼容，新的 S6 组件产线累计投入超过 10 亿美元；二是受限于镀膜工艺，随着组件面积的增加，镀膜的均一性和品质都面临挑战，尤其是针眼等缺陷密度增加导致组件效率下降。

定价&利润率：发电量优势难掩效率短板，标准组件盈利能力依然受限

由于目前薄膜电池的价格透明度远不及晶硅，我们无法获得精确的定价比较。根据 Wind 的数据，目前薄膜电池现货价格约 0.25\$/W，较晶硅电池均价高出近 20% (0.21\$/W)，由于占主流的单晶 PERC 组件目前的实际价格已达 0.27\$/W，我们认为这个数据存在较大疑问，故弃之不用。

我们曾在深度报告《光伏产业研究系列报告（2）：硅片一路线之争尘埃落定，巨头厮杀仍将持续》中构建模型探讨晶硅产品的定价机制，与晶硅组件相比，有三处差异会影响到最终的产品定价：一是组件的能量转换效率，First Solar 新推出的 S6 组件效率约 17~18.4%，略高于多晶组件 (17%)，低于单晶 PERC (18.8%)，在其他因素不变的情况下，效率相差 1 个百分点，最终价格将有 3 分钱的差异；二是组件的规格，晶硅组件目前主要有 2 中规格，标准的 60 型组件尺寸为 1.64 平方米 (1.65m x 0.992m)，72 型组件尺寸为 1.94 平方米 (1.958m x 0.992m)，First Solar 的 S4 产品面积仅有 0.72 平方米，S6 产品面积则达 2.4 平方米，更大的尺寸有助于降低系统的线缆、支架和汇流箱等 BOS 成本，从而为组件产品赢得溢价；三是发电量优势，行业公认 CdTe 电池的发电能力较晶硅电池高 5-8 个百分点，根据测算，发电能力每提升 1 个点也会带来约 0.006 元的溢价。

此外，目前 CdTe 组件最主要的市场在美国，由于美国对中国产的光伏产品征收了双反税和 201 税，导致晶硅产品在美国的售价高出其他地区约 0.1 美元/W，从而为 CdTe 产品价格留出了更高的空间。

图表 30：全球各区域当前组件价格（\$/W）

市场	单晶 310W	多晶 275W
美国（贸易保护）	0.377	0.320
欧洲	0.279	0.220
印度（贸易保护）	—	0.270
澳洲	0.272	0.217
中国	0.278	0.218

资料来源：PV Infolink，东方证券研究所

图表 31：碲化镉成本效率与晶硅比较

薄膜产品	组件效率	每瓦成本
First solar 组件	17-18.2%	0.2\$/W+
龙焱组件	13%-14%	0.22-0.25\$/W
主流单晶	18.8%	0.215\$/W
主流多晶	17.0%	0.207\$/W

资料来源：PV Infolink，东方证券研究所

注：均指组件效率；First Solar 采用 series 6 产品，龙焱采用最新和预投产产线技术水平范围，晶硅采用 18 年底国内行业平均水平，均指 perc 组件；美元汇率=6.8

综上，我们测算的结果表明 CdTe 电池在美国的合理定价可达 0.35\$/W 左右，按照 First Solar S6 产品 0.2\$/W 的成本，产品毛利率可达 43%；如果按照全球平均水平，CdTe 电池定价可达 0.26\$/W，产品毛利率约 23%。目前 First Solar 的组件毛利率约 17%，新产品利润率回升明显，但距离历史高位仍有较大差距。

市场前景：传统市场份额迎来拐点，BIPV 值得期待

我们认为，随着生产成本的下降，目前 CdTe 电池在传统光伏市场已重获竞争力，其市场份额有望企稳回升。据 First Solar 披露，预计 2019 年出货量能够达到 5.4-5.6GW，相比 2018 年的 2.6-2.7GW 翻倍，2020 年底的规划产能将达到 7.6GW，目前公司的在手订单已经超过 11GW，在 First Solar 的推动下，2019 年薄膜电池的市场份额有望提升 2 个百分点左右。另一方面，由于目前成规模的 CdTe 电池企业仅此一家，而且薄膜电池产能扩张的速度受限，在可见的未来 CdTe 电池对于晶硅的主体地位不会造成根本性的冲击。

CdTe 电池的另一个潜在市场在于太阳能光伏建筑一体化。光伏建筑一体化的形式可分为两大类，一类是光伏组件与建筑结合（又称普通型光伏构件，BAPV），即光伏组件依附于建筑物上，建筑物主要作为光伏组件载体；另一类是光伏组件与建筑集成（又称建材型光伏构件，BIPV），即光伏组件与建筑集成后成为不可分割的建筑构件，可以代替部分建筑材料使用。

图表 32：建筑光伏一体化不同类型

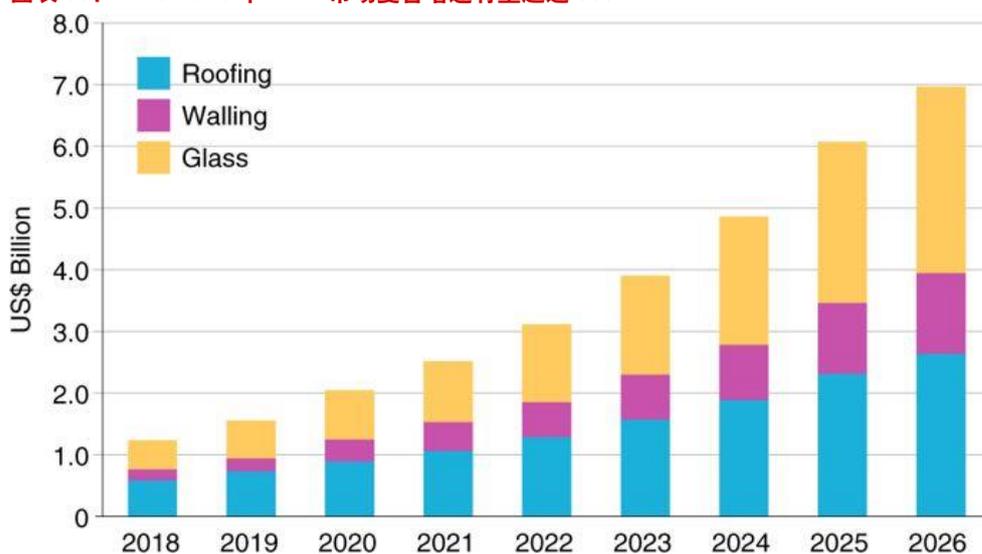
一体化类型	应用形式	附加效益	适用组件
光伏组件与建筑结合 (BAPV)	屋顶倾角	--	无特殊要求，性价比优先，普通型光伏构件
	屋面平铺	保温隔热、通风	
	墙体贴附安装	降低墙体温度，减少空调冷负荷	
光伏组件与建筑集成 (BIPV)	光伏屋顶	节材、保温	建材型光伏构件
	光伏幕墙	遮阳、节材、保温	
	光伏遮阳板	遮阳	
	采光顶	采光、照明、节材	
	阳台护栏	节材	

资料来源：建设科技期刊，东方证券研究所

光伏建筑一体化的概念在 2010 年前后一度流传甚广，但由于与建筑设计的结合不如人意，光伏在建筑的应用主要还是屋顶光伏系统的形式。近年来，随着光伏建材产品的推出，BIPV 市场有望获得突破。最近的一些分析估计，未来十年 BIPV 市场复合增速将达 40%，市场容量从 2017 年的 11 亿美元增长到 2021 年的超过 27 亿美元。

从建筑的角度来看，BIPV 要求光伏组件有各种尺寸，形状和外观（颜色，纹理），以满足美学和技术架构的需求，外墙尤其需要高度的灵活性，因为它们在视觉上要求很高。虽然标准组件可用于预制房屋或工业建筑，但这种结构只代表了少数建筑类型。**传统的晶硅组件单调的形状难以适应建筑师和建筑行业的需求，反而被建筑师视为沉重的技术约束或非美学附加物。**

图表 33：2018-2028 年 BIPV 市场复合增速有望超过 30%



资料来源：Nature Energy，东方证券研究所

CdTe 代表的薄膜电池明显更适应 BIPV 市场的需求。凭借先进的技术，BIPV 现在可以完美地融入建筑外壳中，并充分参与其建筑表达，在比例，表面，颜色和纹理方面具有有趣且具有建筑意义的连贯变化。BIPV 正在成为一种真正的建筑材料，具有建筑和表达的所有传统特征。尽管由于目前市场容量较小，组件定制元素更多，项目持续时间长，导致组件成本上升，但从建材角度，目前基于薄膜电池的组件已经可以切入价格较高的细分市场。

BIPV 元件可以在替代昂贵的通风幕墙（例如，由玻璃，石头或马尔莫制成）中找到高端细分市场入口，这类材料的价格通常为 200~400 欧元/m²。从长远来看，随着产量的增加，标准组件价格有望降至 60-90 欧元/m²，BIPV 元件的成本可能会低于许多外墙材料的成本，甚至接近高质量屋面瓦的成本，大约 50 欧元/m²，届时 BIPV 将为薄膜电池企业打开更大的市场空间。目前，我国的龙焱科技已在光伏玻璃幕墙市场初步打开了局面，其集成了 CdTe 电池的光伏幕墙已应用在诸如园博会中国馆、瑞典光伏小镇等大型公用项目上，视觉、环保效果俱佳。

图表 34：晶硅组件玻璃幕墙室内效果



资料来源：网络资料，东方证券研究所

图表 35：薄膜幕墙室外效果



资料来源：龙焱能源，东方证券研究所

竞争格局：从千帆竞发到一枝独秀，高壁垒铸就优格局

碲化镉电池产业化在 1990 年代初起步，早期产业化进展并不快，不仅与晶硅电池差距巨大，也大幅落后于非晶硅。直到 2005 年前后 First Solar 取得突破性进展，同时多晶硅价格暴涨，晶硅产业处于拥硅为王的时代，越来越多的企业和科研机构开始进入碲化镉电池产业。2009 年，薄膜组件的产量已经达到全球组件产量的约 15%；2012 年，国内外有超过 20 家从事碲化镉产业化公司。随后，一方面晶硅产业链价格的大幅下降导致薄膜电池竞争力减弱，另一方面也是技术和专利壁垒的原因，其他厂商的效率迟迟没有提升，薄膜产品的市场份额大幅衰退。目前，全球只有三家从事碲化镉薄膜组件量产的企业，分别是美国的 First solar，德国的 Calyxo 和中国的龙焱科技，其中 First Solar 一家产量占总体的 99% 以上。

First Solar：CdTe 电池领军者，蓄力五年再启扩张之路

First Solar 一度是全球最大的光伏电池企业，其前身 Solar Cell Inc. 于 1986 年成立，主要开展 CdTe 薄膜电池的研发，1999 年被收购后更名为 First Solar，生产基地位于美国的 Perrysburg 和马来西亚的 Kulim，现在仍然是全球最大的薄膜电池生产企业，2018 年出货量约 2.7GW，占 CdTe 电池总出货量的 99% 以上，全球光伏市场占有率约 2.5%。

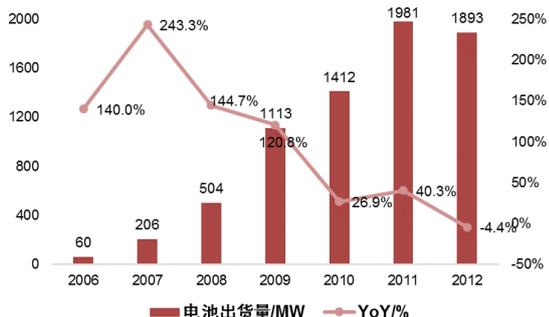
目前公司订单已排到 2020 年，产品供不应求。根据 2018 年年报，公司在手订单已达 11.3GW，排产计划已经排到 2020 年。First Solar 远超薄膜电池同行的表现源于独有的薄膜光伏技术、高度自动化的产线、可扩展的制造能力、在美国电站业务的核心地位以及非常强大的资产负债表。

2002 年，公司建设了第一条试运营生产线，但组件效率仅为 7-8%；2004 年，这条产线经过改造升级为 25MW 规模的量产线，组件效率 10%，量产后的生产成本直线降至晶硅的 2/3 左右，并将优势保持了 7 年之久。First Solar 抓住机会迅速扩产，2006-2009 年期间年出货量增速均超过 100%，4 年 CAGR 达 158%，2009 年公司成为全球首家光伏组件成本小于 1 美元每瓦的公司，CdTe 组件出货量达 1.1GW，成为当时全球成本最低、出货量最大的光伏电池企业。

与此同时，多晶硅价格结束了长达 5 年的涨价浪潮，现货价格从 2008 年高点近 500 美元/kg 暴跌到 40-50 美元/kg，开启了晶硅产业链持续快速降本之路，这也导致碲化镉组件的性价比受到了直接冲击，First Solar 甚至对碲化镉技术路线的信心也开始动摇。2010 年，公司在美国硅谷设立研究室开始研究 CIGS 薄膜技术；2013 年还引进了 TetraSun 的单晶硅技术，并在马来西亚开

设了 100MW 的晶硅电池产线；这些都是为了碲化镉技术难以突破做的第二手准备。公司开始控制产能扩张和资本开支，组件出货量增速也显著回落，到 2012 年组件出货量约 1.9GW，已经退居全球第 2 大电池企业，综合毛利率从超过 50% 降至 20% 左右。

图表 36：First Solar 上市以来营收及毛利率情况统计



资料来源：公司公告，东方证券研究所

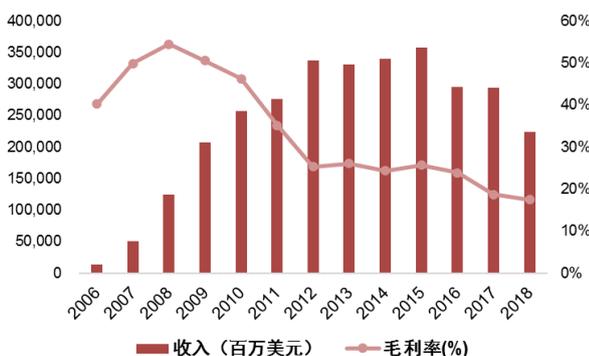
图表 37：First Solar 研发成果路线图



资料来源：公司材料，东方证券研究所

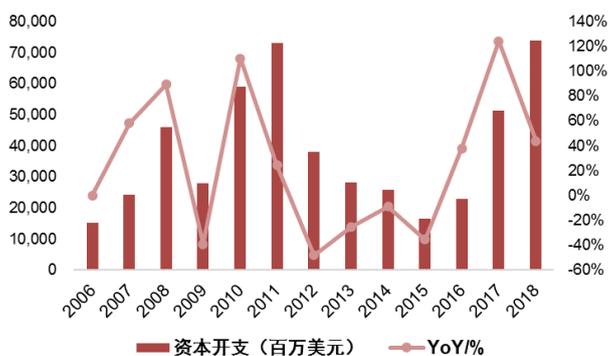
2012 年至今，公司一方面加大电站 EPC 业务稳定营收，另一方面重新聚焦 CdTe 电池，通过提高电池转换效率降低成本。2011 年公司打破保持了 10 年之久的 CdTe 电池效率记录，之后更连续 8 次打破新的记录，以每年一个点的速率提升的同时，也快速提高了组件的性价比。目前公司的实验室电池效率达 22.1%，组件效率达 18.6%，量产组件效率 17%。考虑到实验室成果向产业转化的滞后，中短期内公司组件效率有望超过 19%。随着 S6 组件产品的推出，公司 CdTe 电池重夺性价比优势，也再度增加资本开支，展开新一轮产能扩张，公司 2019 年预计出货量高达 5.4-5.6GW，同比翻倍，2020 年的目标产能将超过 7.6GW，较 2017 年增加近 2 倍。

图表 38：First Solar 上市以来营收及毛利率情况统计



资料来源：公司公告，东方证券研究所

图表 39：First Solar 上市以来资本开支情况统计



资料来源：Wind，东方证券研究所

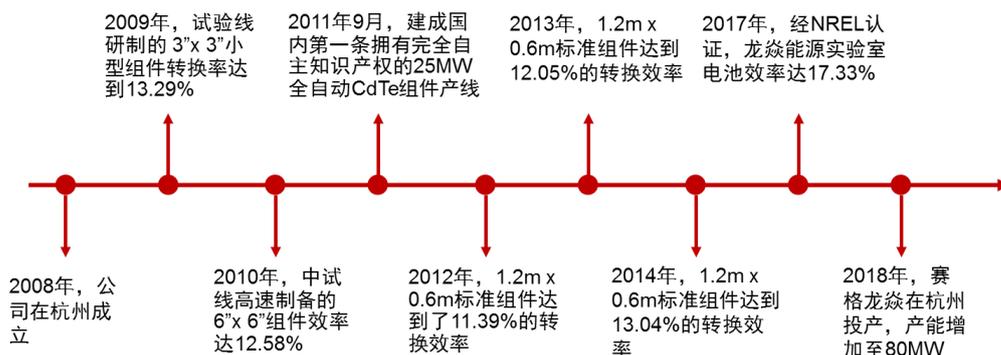
龙焱能源科技：立足 BIPV 市场，先强后大稳步发展

龙焱能源科技于 2008 年 5 月成立，创始人系曾经的碲化镉电池记录创造者，光伏专家吴选之先生。吴选之是我国最早的薄膜电池领域专家，从事各类太阳能电池（包括晶硅、非晶硅、TPV 和碲化镉等）研究近 40 年，1988 年，吴选之作为核心项目负责人，设计建设了国内第一条非晶硅薄膜组件中试生产线。

1985年，吴先生前往美国国家可再生能源实验室（NREL）继续从事相关研究工作，主要从事太阳能电池器件研究。2001年，吴选之及其团队在实验室制备的碲化镉薄膜太阳能电池转换效率达到16.7%，成为当时的世界纪录，这一记录在10年后才被First Solar打破。

2008年5月，吴选之在杭州（下沙）经济技术开发区创建了龙焱能源科技（杭州）有限公司。10年来龙焱团队，坚持走自主创新、先强后大的理性发展道路，在中国实现了碲化镉薄膜太阳能电池技术的产业化，成为目前中国唯一一家可规模生产碲化镉薄膜组件的企业。公司目前自有一条年产能40MW产线，另外与深赛格共建一条40MW产线，还分别和山西阳泰和湖北凯龙共同投资产线。这些生产线都是全自动的，产线上的四十余台生产设备全部实现国产化。

图表 40：龙焱能源 CdTe 电池产业技术水平稳步提升



资料来源：龙焱能源官网，东方证券研究所

经过多年探索，目前龙焱能源的 CdTe 电池实验室最高效率已经超过 17%，组件量产效率在 13%-14%，产品出口到 38 个国家和地区，应用领域覆盖分布式屋顶光伏电站、BIPV 应用和离网系统应用等，是光伏市场的后起之秀。值得一提的是，龙焱是唯一能够生产高效透光组件的公司，在光伏幕墙应用上有独特优势。公司目前具备 40 万平米光伏幕墙的年产能，年产值近 3 亿元，净利润达 4000 万元以上。

从中长期来看，龙焱科技凭借完全自主知识产权的技术体系，在多个发展路径上享有充分的主动性：BIPV 方面，公司目前是全球仅有的能够批量定制化生产 BIPV 组件的电池厂家，并且储备了丰富的产品和客户资源，目前 BIPV 市场和公司产能都比较小，未来仍有充足的市场空间等待拓展；标准组件方面，公司目前 0.72 平米标准组件的效率已达 14%，成本已降至 1.6~1.8 元/W，未来通过产能扩张和管理优化，有望实现高转换效率、高良品率、高产出、高稳定性和低成本，预计大组件量产有望将成本降至 1.2 元/W，市场竞争力进一步增强；此外，公司还可通过输出技术、管理甚至整线来进行业务拓展，和赛格龙焱联合投产的 40MW 新产线即采用该模式。

公司是国内科技领域拥有完全自主知识产权的典范，符合科创板定位，尽管公司已经能够实现稳定盈利，但目前碲化镉电池提效处于关键阶段，产能也较小，后续降本还需要持续的研发投入和产能扩张，也存在融资需求。

Calyxo：重要订单被取消，规模扩张遇困境

德国 Calyxo GmbH 公司成立于 2005 年，是一家生产碲化镉薄膜太阳能电池组件制造商和光伏发电系统供应商，在德国拥有 25MW 和 60MW 两条碲化镉薄膜太阳能电池组件生产线。2012 年

Calyxo 公司碲化镉薄膜太阳能电池组件的生产成本约为 0.8 美元/W，中期的目标是将生产成本降低到 0.5 美元/W，目前该公司碲化镉薄膜太阳能电池组件的转换效率达到 13.4%，其实验室电池转换效率已达 16.2%，并得到德国 SGS 测试机构的验证。

2018 年 4 月下旬，由于重要订单被取消导致资金流动性困难，公司向当地法院申请了破产；同年 7 月，公司宣布被机械和设备工程制造商 TS Group 收购，撤回破产申请。公司目前的经营现金流可能存在一定问题，叠加欧洲 MIP 政策如期结束，产品竞争环境恶化，产能扩张或受限，未来产品主要集中在欧洲当地市场。

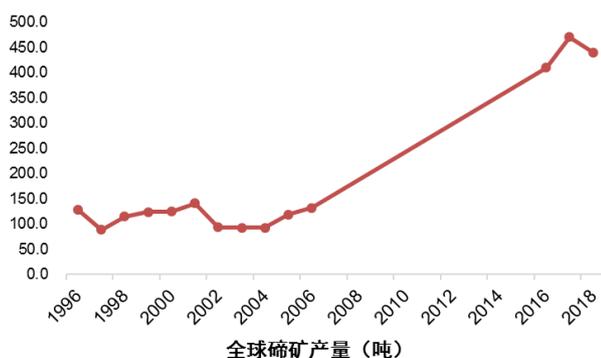
质疑：技术、原料、Cd 污染

从历史上看，碲化镉薄膜电池发展也曾面对不少质疑，主要集中在技术、原料供应以及毒性三方面：

技术上，尽管碲化镉电池的理论效率高达 32%，并早在 1993 年实验室效率已达 16%，但在随后的 18 年里迟迟未能突破，其主要原因是薄膜沉积工艺和界面工程水平较低，导致效率损失居高不下。First Solar 在 2011 年实现了效率突破，目前进入了提效的又一个瓶颈期；龙焱仍处于第一阶段，随着产能放大，研究资源相应增加，其电池效率有望快速追赶龙头。成本上，目前 First Solar 的技术水平和生产成本遥遥领先，但龙焱和 Calyxo 这类小规模厂商，仍未充分发挥规模经济效益和管理优化等因素，同时技术本身的优化空间也较大，成本上仍有可能出现显著下滑。

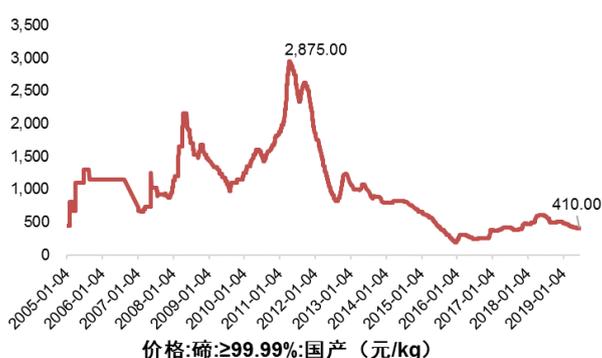
原料供应主要是碲矿的储量和价格问题。碲矿是地球上储量较少的稀有元素，2018 年，全球碲储量为 3.1 万吨，年产量 440 吨。按照 First Solar 组件效率 16%，活性层厚度 2 μ m 计，1GW CdTe 组件对碲的需求仅有大约 40 吨，随着效率提升和活性层厚度下降，碲矿用量可进一步削减至 10 吨/GW 以下。因此，短期内碲储量并不会对行业发展构成巨大障碍。此外，产能扩张后也可以通过开展碲回收业务形成原料的循环再利用，降低成本。

图表 41：碲产量（吨）总体呈增加趋势



资料来源：Wind，东方证券研究所

图表 42：碲矿价格（元/kg）近年来处于低位

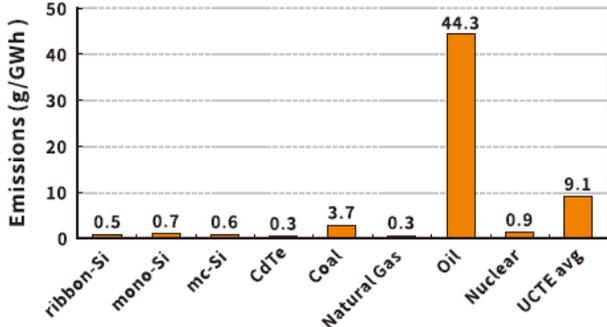


资料来源：Wind，东方证券研究所

最后一个担忧是 CdTe 材料的污染问题，CdTe 电池的活性层及 CdS 缓冲层中均含有毒性较大的重金属元素镉（Cd），但值得庆幸的是，CdTe 电池中，镉元素均以稳定化合物形式存在。美国能源部曾系统性研究过镉污染的问题，如果考虑从初始矿石加工到太阳能电池的全生命周期使用过程，各大能源中石油的镉排放量最高，达到了 44.3g/GWh，煤次之，而碲化镉电池的镉排放量最低，为 0.3 g/GWh，主要原因是碲化镉不同于镉单质，它是稳定的，不容易释放。如果将硅电池的碲化镉电池各大重金属的排放情况做个比较的话，碲化镉电池的砷、铬、铅等金属的排放量也是优于晶硅的。因此，碲化镉产品是环境友好、安全可控的，不存在环境污染以及政策限制的问题，

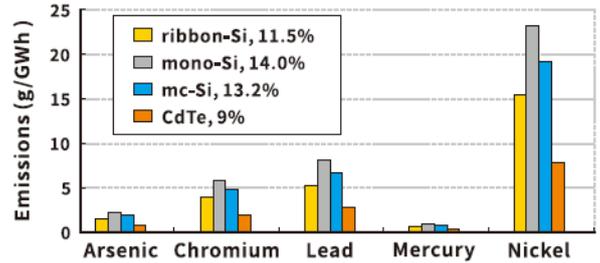
目前欧盟已经豁免了 RoHS（《关于限制在电子电器设备中使用某些有害成分的指令》）的要求，其他市场也基本不存在政策风险。

图表 43：太阳能电池组件和其他能源的镉排放比较图



资料来源：美国能源部，东方证券研究所

图表 44：硅电池和碲化镉电池重金属排放比较图



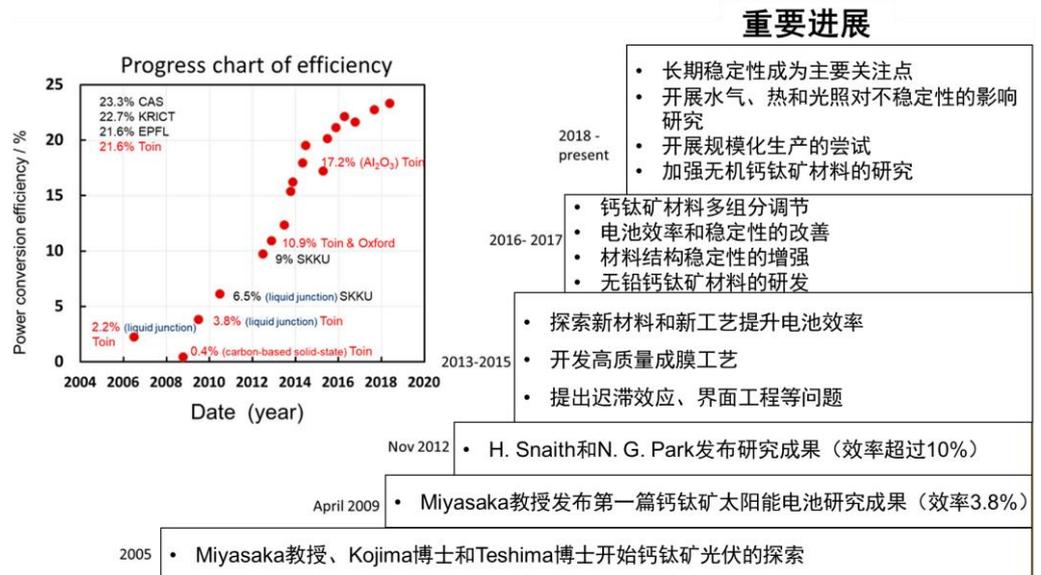
资料来源：美国能源部，东方证券研究所

钙钛矿电池：冉冉升起的超新星

简介：钙钛矿是个什么矿？

钙钛矿太阳能电池是近年来蓬勃兴起的一种新型太阳能电池技术。2009 年，日本科学家首次将 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 作为染料应用于染料敏化电池结构，获得了 3.8% 的能量转换效率，开启了太阳能电池研究的新天地。到目前为止，钙钛矿电池的最高能量转换效率已经突破 24%，与晶硅叠层电池转换效率突破 28%，仅用 10 年时间即取得了其它种类电池几十年才实现的成就。

图表 45：2005-2018 年钙钛矿电池具有里程碑意义的研究进展统计

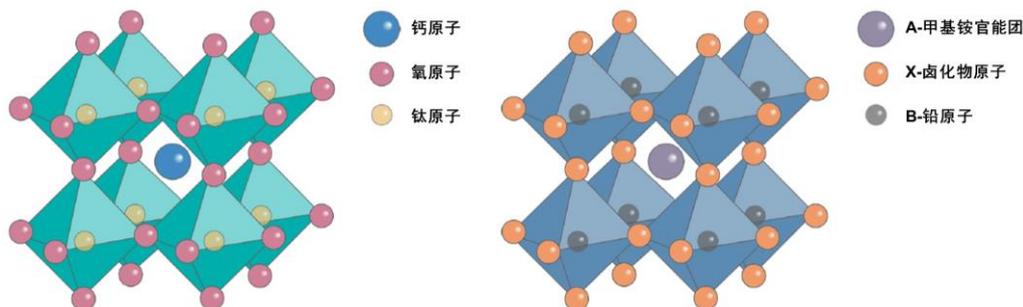


资料来源：Chemical Reviews，东方证券研究所

钙钛矿以俄国科学家 Lev Perovski 名字命名，具有与 CaTiO_3 相似的立方晶体结构，化学式为 ABX_3 ，其中 X 原子与 B 原子配位形成正八面体 BX_6 ，B 原子位于八面体的中心，而 X 原子在八面体的六

个顶角上，相邻的八面体通过顶角共享形成扩展的空间三维网络结构。应用于太阳能电池中的钙钛矿材料，A一般是有机胺离子（如 CH_3NH_3^+ ， $\text{NH}=\text{CHNH}_3^+$ ），B一般是二价金属离子（如 Pb^{2+} ， Sn^{2+} 等），X表示卤素离子（ Cl^- ， Br^- ， I^- ）。由于它们的离子半径比较恰当，尺寸较小的有机离子可以调节无机离子间的空隙，使得无机卤化金属可以构成连续的八面体骨架，形成近似于立方体较为规整的晶型。紧密堆叠所得的三维连续结构拥有较窄的带隙和极为理想的能带结构。

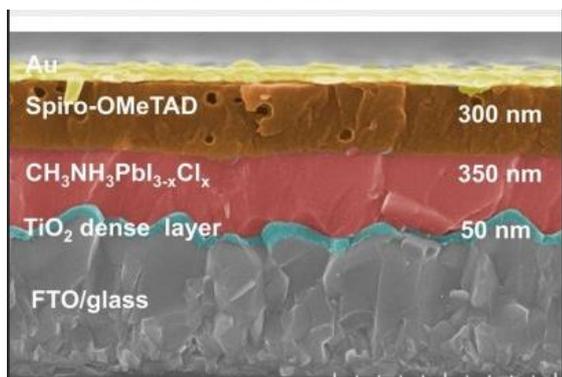
图表 46：典型的钙钛矿晶体结构（左）和钙钛矿电池（右）活性材料空间结构



资料来源：东方证券研究所整理

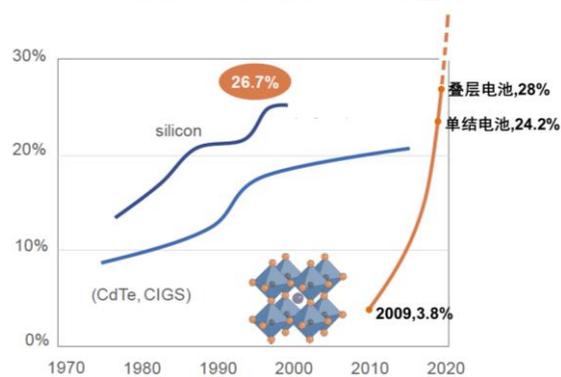
钙钛矿电池的优越性在于材料先天优势。首先钙钛矿的材料吸光能力远超晶硅，因此电池中钙钛矿层的厚度在 $0.3\mu\text{m}$ 左右，叠加其他功能层（除玻璃）合计厚度也不超过 $1\mu\text{m}$ 。其次钙钛矿材料的优化空间更大，可以改进配方的元素及配比，而晶硅材料只能提纯，材料优化的性价比较低。另外，钙钛矿对纯度不敏感，目前98%左右的纯度即可满足要求，而晶硅对杂质敏感，需要99.9999%（6个N）以上才能用于电池制造。最后，钙钛矿的工艺流程通常在 150°C 以下，能耗有天然优势。晶硅电池端的烧结温度在 $800-900^\circ\text{C}$ 之间，硅片端的铸锭温度更是超过 1500 度。

图表 47：一种典型的钙钛矿薄膜电池结构



资料来源：东京大学，东方证券研究所

图表 48：钙钛矿电池效率提升速度显著高于主流技术



资料来源：Oxford PV，东方证券研究所

另一方面，由于钙钛矿材料的生产制备极为简易，其稳定性和使用寿命较晶硅和无机薄膜材料有明显差距。钙钛矿材料本身遇水即快速分解，常用结构中的 TiO_2 具有光催化性能，在紫外线照射下也可催化钙钛矿材料发生分解反应，此外，常用的有机空穴传输材料也不耐水，因此常规的钙钛矿电池在水氧含量较高的环境中寿命很短。2009年刚问世的钙钛矿电池效率只维持了几个小时，但经过科学家十几年的努力，目前钙钛矿电池已可在极其严酷的条件下稳定运行几千个小时，其实际使用寿命可达10年以上。

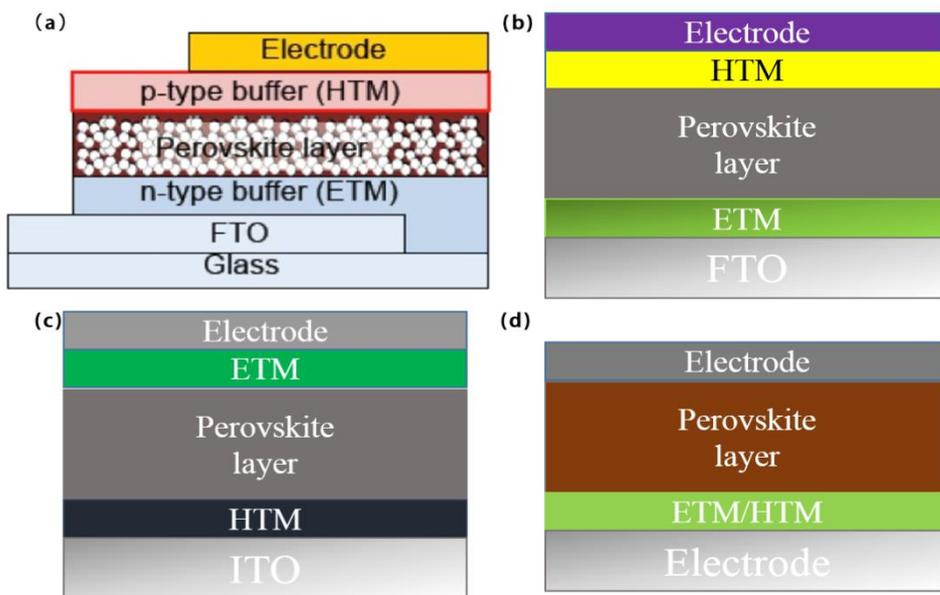
技术路线：单结&叠层并行不悖，适用多元应用场景

技术路线方面，尽管已经历了近十年的发展，但一些基础问题，如电池器件的结构、应用方式（单结还是叠层）以及应用场景上都存在不确定性。越来越多的研究表明，得益于钙钛矿材料的卓越性能，钙钛矿电池在几乎所有可能的方向上都取得了令人振奋的成果。

器件结构：正反向不分高下，多层介孔结构稳定性突出

早期的钙钛矿电池结构借鉴了固态染料敏化电池的经典结构，即采用一层介孔状的二氧化钛作为骨架并承担电子转移运输的功能，介孔层的厚度达 300~500 μm ，并且需要高温烧结；随着钙钛矿材料的优异性能日益彰显，科研人员将在有机太阳能电池中的研究成果应用到钙钛矿电池里，开发出平面结构的钙钛矿电池，大大简化了器件的制备流程，并在正式结构（阳光从空穴传输层射入）和反式结构（阳光从电子传输层射入）中均取得较好的成果。目前最高效率的钙钛矿电池采用经典的介孔结构，但正式和反式的电池效率也能达到 20%以上，因此钙钛矿电池的最佳结构仍未有定论。

图表 49：钙钛矿电池的典型结构，a) 介孔结构，b) n-i-p 平面结构，c) p-i-n 平面结构 (d) 双层平面异质结构



资料来源：SCI 论文，东方证券研究所整理

值得一提的是，华中科技大学研究团队采用双介孔和印刷碳电极的结构制备出了稳定性优越的电池器件和小组件，尽管能量转换效率只有 12.7%，但组件运行寿命超过 2000 小时，是钙钛矿组件目前为止最高的使用寿命。

图表 50：各类钙钛矿电池结构及其代表器件转换效率

	器件结构	转换效率
介孔结构	FTO/TiO ₂ 介孔/FAMAPbI ₃ /PTAA	22.10%
正式平面结构	ITO/SnO ₂ /FAMAPbI ₃ /Spiro-OMeTAD	21.60%
反式平面结构	ITO/PTAA/FAMAPbI ₃ /GuaBr	20.90%

多层介孔结构	FTO/TiO ₂ /ZrO ₂ /MAPbI ₃ /碳电极	12.7%
--------	---	-------

资料来源：Applied Physics Reviews，东方证券研究所

前进方向：挑战晶硅 OR 携手共进

另一个引人关注的问题是钙钛矿电池的前进方向。钙钛矿优越的材料性能预示着理论上它具备颠覆现有光伏格局的能力，目前科研领域正在关注单结钙钛矿电池的转换效率、稳定性和降低铅污染，有初创企业推出的单结组件能量转换效率已超过 17%，接近多晶硅组件的转换效率，并且理论成本更低；但另一方面，晶硅电池经过半个世纪的发展，现在已经实现了平价上网的伟大目标，并且积累了上万亿的资产体量，如果被完全替代会带来巨大的投资损失，薄膜电池天然具备良好的与其他电池结合的性能，因此产业内也有企业在致力于实现传统晶硅电池和钙钛矿电池的完美融合。

单结电池最终不得不直面晶硅电池的竞争。晶硅产品经历了单晶革命和“531 新政”的洗礼之后，组件含税价格已跌破 2 元/W，多晶组件成本已降至 1.4 元/W 以下，但由于产业链各环节的利润受到极大挤压，预计晶硅电池后续降本速度将显著放缓。钙钛矿电池则由于其一系列先天优势，产品降本潜力极大，根据协鑫的测算，钙钛矿电池产能达到 100MW 时，其生产成本可降至 0.94 元/W，产能达到 1GW，生产成本可降至 0.8 元/W 以下。毋庸置疑的是，尽管钙钛矿电池仍然面临寿命和效率的问题，但巨大的降本潜力对于传统的晶硅电池极具威胁。

图表 51：苏州协鑫生产的 71x41 小组件



资料来源：苏州协鑫，东方证券研究所

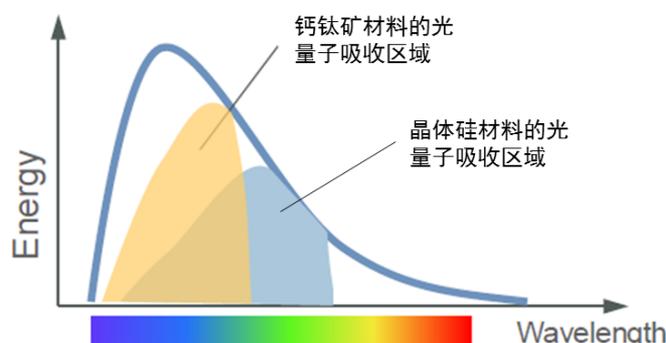
图表 52：苏州协鑫 100MW 钙钛矿组件成本拆分

项目	成本（万元）	占比
玻璃及其他封装材料	3000	31.9%
靶材	3500	37.2%
钙钛矿	500	5.3%
能源动力	1300	13.8%
固定资产折旧	800	8.5%
人工资本	300	3.2%
合计	9400	100%

资料来源：苏州协鑫，东方证券研究所

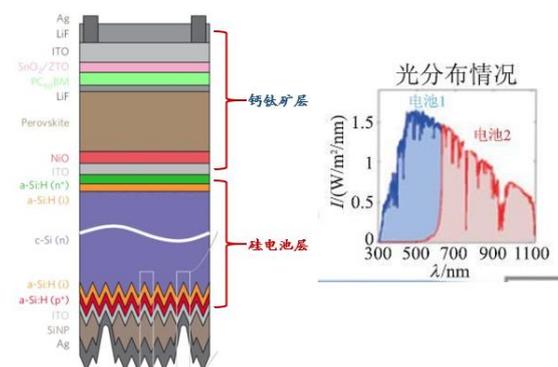
晶硅/钙钛矿叠层电池有望打造出一种更具性价比的新型产品。单结晶硅电池的理论极限效率约为 29%，目前实验室最高效率已达 26.7%，量产的高效单晶 PERC 电池已达到 22%，业内估计当前主流的高效电池技术量产效率达到 23-24% 将遇到瓶颈。随着多晶硅到组件的成本下降空间日益狭小，组件和系统的非硅成本比重不断提升，组件的发展重心从降本转向增效。钙钛矿电池凭借简单的制造工艺和完美互补的光电特性，成为与晶硅叠层的完美候选。理论计算表明，晶硅+钙钛矿叠层电池的理论效率有望达到 43%。目前牛津光伏研发的晶硅/钙钛矿叠层电池转换效率已突破 28%，该产品有望将光伏的 LCOE 再降低 20% 以上。

图表 53：晶体硅/钙钛矿叠层电池大幅提升太阳光利用水平



资料来源：Oxford PV，东方证券研究所

图表 54：一种钙钛矿/晶硅叠层电池结构



资料来源：中国物理学会期刊网，东方证券研究所

然而，由于多数晶体硅电池技术都需要高温烧结，而且表面粗糙度大（达到数微米），与不耐高温并且厚度仅有几百纳米的钙钛矿薄膜匹配度并不理想。在目前可见的晶硅电池技术中，HIT（异质结）技术匹配度最好，HIT 的生产工艺低于 200°C，并且较高的投资成本导致其性价比优势并不突出，HIT 与钙钛矿结合有望出现“1+1>2”的效应。目前，梅耶博格已经在加强与牛津光伏的合作，预计 2021 年前后将推出 HIT+钙钛矿叠层电池设备，产品设计效率达 27%，有可能为电池技术带来新一轮革命。

此外，钙钛矿电池还能广泛地应用于柔性场景。目前基于不锈钢、PET 聚合物等柔性基底的钙钛矿电池已有成果推出，甚至还有线状的钙钛矿电池，这些形态结构可用于 BIPV 以及便携式可穿戴设备，应用场景更加广泛。

性价比分析：成本优势突出，稳定性问题待解决

生产流程：原材料成本低廉，可采用液相法生产

与晶硅电池漫长的产业链和复杂的工艺流程相比，钙钛矿电池的生产流程极其简洁。原料方面，以经典的 n-i-p 型异质结结构为例，钙钛矿电池活性层材料由碘化铅 (PbI₂) 和碘化甲基铵 (CH₃NH₃I) 在溶剂里混合而成，PbI₂ 的自然界储量丰富，高纯的科研级产品售价仅有 3-10 元/g，CH₃NH₃I 可通过低成本工艺大量合成，科研级产品售价约 50 元/g，按照 300nm 厚度计，每平米组件仅需 1.5g 钙钛矿材料，如果大批量生产，每块组件的钙钛矿材料成本只有 3 元左右。其他材料，电子传输材料 TiO₂ 价格也非常低廉，空穴传输材料 Spiro-OMeTAD 现在只有实验室小批量合成，价格较高，但大批量产后降价空间巨大，且存在成本很低的无机材料替代。银电极是成本最高的部分，根据工艺不同每块组件的电极成本约为 10-45 元之间。

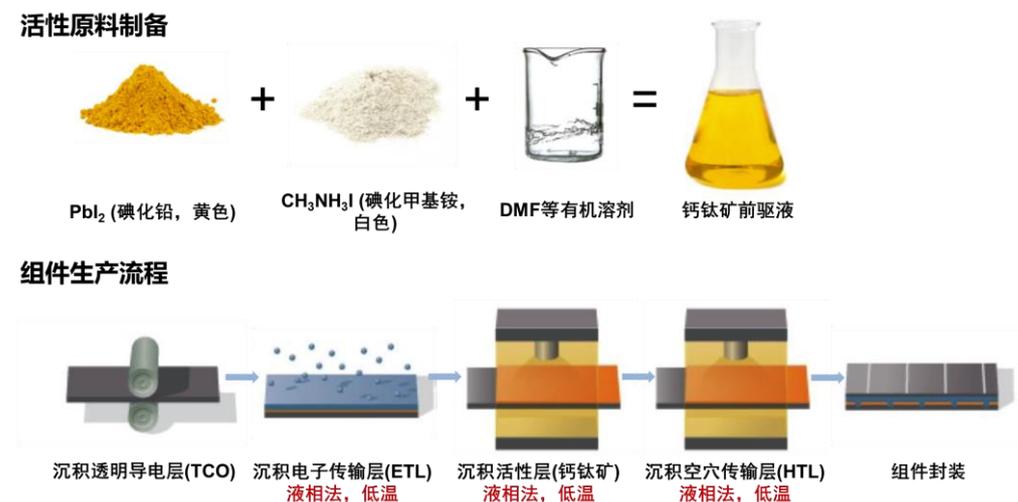
图表 55：钙钛矿组件 (0.72m²) 原材料成本明细

材料	厚度 /nm	用量 (g/块)	价格-科研级 (元/g)	成本 (元/块)	价格-工业级 (元/g)	成本 (元/块)
TiO ₂	30	0.09	20	1.8	1	0.09
CH ₃ NH ₃ PbI ₃	300	1.08	100	108.0	3	3.24
Spiro-OMeTAD	200	0.29	800	230.4	30	8.64

资料来源：东方证券研究所整理测算

制备工艺方面，钙钛矿电池的 4 层功能层中，只有导电玻璃需要用到真空方法，而且是非常成熟的溅射方法；缓冲层和活性层都可以通过液相法制备，全程的温度最高不超过 200℃，能耗非常低。值得一提的是，钙钛矿活性材料本身不仅成本低廉，而且配制过程简易，远远低于多晶硅料的生产成本。

图表 56：钙钛矿材料及组件生产流程



资料来源：Oxford PV，东方证券研究所

成本解析：封装、电极构成成本主体，工艺优化是降本必由之路

我们以 1 条 40MW 产能的产线为例，测算钙钛矿电池产线的各项成本，钙钛矿电池所用的设备数量和价格较 CdTe 产线更低，预计该条产线投资可控制在 5000 万元左右，其他参数明细如下：

图表 57：一条 45MW 钙钛矿电池产线主要参数

生产节拍/s	60	小时产量 (块)	60	生产小时数/h	22
日产量 (块)	1320	年产量 (块)	448800	转换效率/%	14%
规格 (m ²)	0.72	单块功率/W	100.8	年产能/MW	45

资料来源：东方证券研究所整理测算

我们测算的结果表明，小批量量产的钙钛矿电池成本已经可以做到 1.2 元/W，低于成本最低的一体化晶硅组件，但目前面临着效率和输出功率低、组件寿命短等问题，仍不具备大规模产业化的条件。从结构上看，钙钛矿电池中折旧成本低于 CdTe 电池，但封装、电极的制作成本远高于 CdTe 和晶硅电池，因此其后续需要明确和优化部分功能层的制备工艺，然后通过规模化降低设备成本。

图表 58：钙钛矿组件成本明细

	成本 (元/块)	单价	用量	成本 (元/W)	占比/%
折旧	11.14	-	-	0.11	9.2%
导电玻璃	36.00	50 元/m ²	0.72m ²	0.36	29.9%
普通玻璃	10.80	15 元/m ²	0.72m ²	0.11	9.0%
原材料	4.66			0.05	3.9%

人工	4.46	10 万元/年	20 人	0.16	3.7%
能源动力	11.64			0.13	9.7%
电极	26.82			0.27	22.3%
接线盒及其他	15			0.15	12.4%
合计	120.51			1.20	

资料来源：东方证券研究所测算

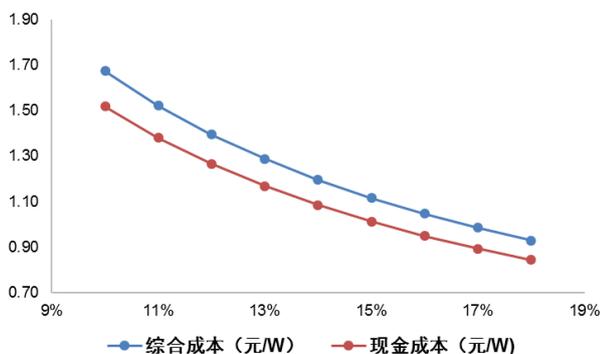
根据该模型，对影响成本的各项因素做敏感性分析，在不考虑物料成本和人工成本下降空间的情况下，电池成本最敏感的因素主要是产能投资、生产节拍和能量转换效率。

设备投资方面，钙钛矿电池的生产设备用到的真空设备较少，目前由于规模较小，且仍在探索阶段，多为非标定制化生产，因此初始投资额较高，折算每 W 的折旧成本约 0.11 元，占比近 9%。经比较，我们认为量产后钙钛矿电池设备的成本不应高于 HIT 设备，目前 HIT 设备的成本约 10 亿元/GW，量产后钙钛矿电池折旧成本应低于 0.1 元/W。生产节拍对电池成本影响也比较明显，主要通过折旧、人工、水电等因素体现。钙钛矿组件的镀膜工艺和后处理条件都比较简单，节拍后续有望降至 30s 左右，带动成本下降 0.08 元/W，其中折旧成本贡献最大，达 0.05 元/W。

我们认为，提高组件的能量转换效率和尺寸规格是后续降本最有力的方式。据测算，如果组件的能量转换效率从 14% 的基准线上提升到 17%，组件成本有望降至 1 元/W 以下，其中现金成本降至 0.89 元/W 左右。

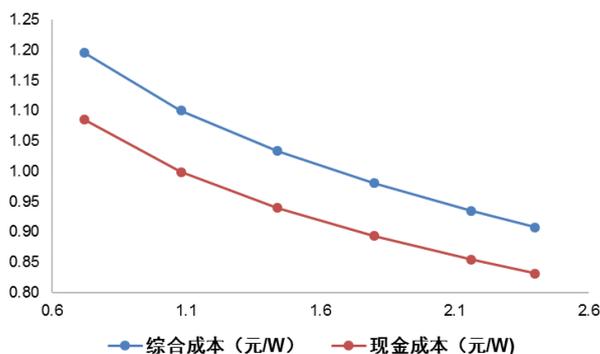
除了上述因素外，增大组件的尺寸规格也是降低成本极为有效的方案。目前主流的薄膜太阳能组件规格依然是 1.2m x 0.6m，面积只有 60 型晶硅组件的 44%。与此同时，由于规模效应，在其他参数不变的情况下，组件尺寸每增加 1 倍，其他相关成本增加 85% 左右，因此增大组件尺寸是薄膜电池降本的有效手段。我们在模型里加入了一个修正因子，结果显示，当组件面积从 0.72m² 每增加一倍，组件成本将下降 14%。

图表 59：电池效率提升能够显著降低钙钛矿组件成本



资料来源：东方证券研究所

图表 60：组件尺寸增大能够有效降低钙钛矿组件成本



资料来源：东方证券研究所

如果能将高效率和大尺寸合二为一，钙钛矿组件的成本下降更加明显。据测算，如果组件效率达到 17%，规格达到 2.4m²，钙钛矿组件的成本将降至 0.75 元/W；如果能进一步改善电极工艺，组件成本有望进一步降至 0.7 元/W 以下。

商业化的三道关卡：稳定性、大面积工艺和铅污染

稳定性—十年寿命是进入门槛

钙钛矿电池从商业化的早期走向成熟的产业化，稳定性是首先需要克服的问题。钙钛矿电池在潮湿、炎热、紫外光照和氧气环境下都会发生变质，电池性能快速发生不可逆的衰退，因此材料的耐候性和封装都至关重要。由于钙钛矿电池发展时间较短，产业化也处于早期，目前钙钛矿组件的寿命已经从早期的几个小时延长到五年左右，但距离晶硅组件 25 年质保期还有很大差距；未来，凭借钙钛矿配方的可调性和封装材料的选择和优化，进一步延长组件的寿命仍然是一个重要的命题。

我们构建了一个光伏发电项目测算钙钛矿组件寿命对全生命周期平准化度电成本（Levelized Cost of Electricity, LCOE）的影响，基准情况下的电站运行参数如下：

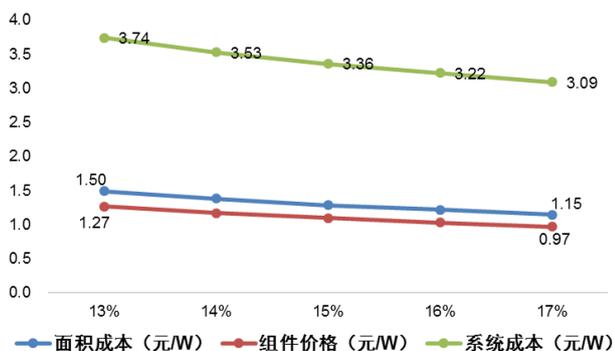
图表 61：某三类资源区典型项目参数

初始投资	4.2 元/W	发电时长	1200h	折旧年限	15	残值率	5%
运维成本	0.05 元/kWh	贷款比例	70%	贷款利率	6%	还款年限	10
贴现率/预期收益率	7.5%		LCOE	0.5074 元/kWh			

资料来源：东方证券研究所测算

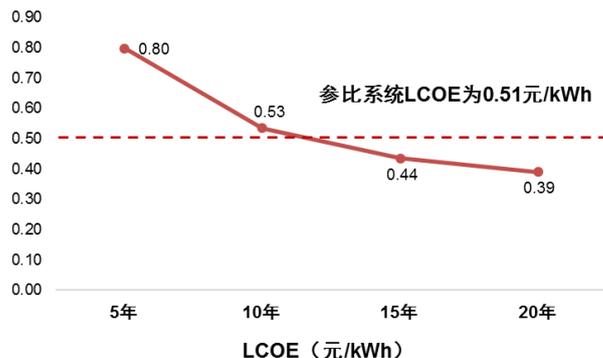
如果采用钙钛矿组件，上表中的大量参数将发生明显变化，首先是系统投资，根据我们的模型测算，假如钙钛矿组件采用 S6 规格（1.2m x 0.6m），当效率在 13~17% 间波动时，组件价格将在 0.97~1.27 元/W 间波动，考虑到对系统面积成本的影响，系统成本将在 3.09~3.74 元/W 间波动，我们假设量产钙钛矿组件效率达到 16%，对应的组件价格和系统成本分别为 1.03 元/W 和 3.22 元/W；其次是折旧年限和残值率，钙钛矿组件寿命短于 15 年时，按照全寿命折旧，长于 15 年时，按照 15 年折旧，残值率为 20%；第三是还款年限，钙钛矿组件寿命短于 10 年时，按照全寿命还款，长于 10 年时，按照 10 年还款；最终影响到 LCOE。

图表 62：不同组件效率下钙钛矿光伏系统成本明细



资料来源：东方证券研究所

图表 63：钙钛矿组件寿命超过 10 年即能实现与晶硅同等 LCOE



资料来源：东方证券研究所

根据测算结果，当钙钛矿电池的寿命达到 10 年以上时，其 LCOE 与晶硅的差距就已经不大，如果能够达到 15 年，LCOE 已具备一定的优势。当钙钛矿的寿命进一步延长，寿命对于 LCOE 的边际改善减弱。同时考虑寿命进一步延长所需要的成本和研发投入也会边际增加，所以我们认为钙钛矿组件未来不需要和晶硅一样达到 25 年才能产业化，只需要达到 10 年以上，性能和衰减符合要求，在市场上就已具备一定的竞争力。

与此同时，近年来钙钛矿电池稳定性的改善已取得很大进展。钙钛矿材料的不稳定性主要源自遇水分解，对于氧气和紫外线的敏感主要是由电子传输层的界面缺陷引起，改善钙钛矿电池稳定性主要从材料组分优化、界面工程和加强封装三个路线出发。目前学术界在组分优化、界面工程等方面已取得大量成果，在实验室条件下，有很多配方都能实现连续工作 1000 小时而衰减低于 1%；封装工艺则有赖产业界的技术进步，最近已有报道钙钛矿组件按照国际通行的“双 85”检测标准，经过连续 1000 小时的测试，衰减明显低于 5%，符合现行国际标准。

此外，钙钛矿组件的成本结构和材料易分解的特性预示着一一条崭新的开发路径，即在电池衰减之后回收废旧组件，用水或其他溶剂冲洗掉活性层，可以实现封装材料的再利用，从而大幅节约生产成本。

薄膜沉积工艺—对成本有决定性的影响

薄膜沉积工艺是薄膜太阳能电池的核心环节，当前钙钛矿电池实验室的转换效率已经突破 24%，但小组件效率不足 18%，大面积组件效率仅有 10% 出头，其主要原因是缺乏大面积、高性能的钙钛矿薄膜沉积工艺。

卷对卷工艺（roll to roll）被普遍认为是低成本制备薄膜最好的方式。目前钙钛矿薄膜的制备工艺繁多，而且各自都能取得比较好的成果。从已公开发布的研究成果来看，小面积下采用旋涂法得到的电池效率最高，这也是实验室使用最多的工艺，但旋涂法无法推广到卷对卷工艺，并且存在基片中央与周围成膜不均匀的问题，一旦放大电池效率均一性无法保证，此外，旋涂法的材料浪费比率较高，也不利于低成本生产。

因此，产业界仍在寻求其他镀膜工艺，目前刮涂法、丝网印刷、slot die 工艺和真空蒸镀法都已取得 10% 以上的组件转换效率，业内领先的牛津光伏已经明采用真空蒸镀法作为产业化的主要工艺。我们认为镀膜工艺本质上属于工程问题，预计随着行业经验的积累将出现成本、性能综合评分最好的工艺。

图表 64：目前主要的钙钛矿层沉积工艺及其研究成果

沉积工艺	能否卷对卷	材料浪费比率	膜厚控制精度	层	典型成果
旋涂法	否	非常高	非常好	ETL、HTL、钙钛矿层、电极	13.6% (4cm ²) , 12.9% (40cm ²)
刮涂法	能	中性	好	ETL、HTL、钙钛矿层	10.4% (10cm ²) , 4.3% (100cm ²)
slot die coating	能	低	非常好	ETL、HTL、钙钛矿层	4.57% (47.3 cm ²) , 10% (168 cm ²)
喷涂法	能	取决于基地面积和喷涂设备	低	ETL、HTL、钙钛矿层、电极	只有电池数据，无组件产品
丝网印刷	能	低	中性	ETL、HTL、钙钛矿层、电极	13% (10 cm ²) , 9.9% (47.6 cm ²)
真空蒸镀	能	低	非常好	ETL、HTL、钙钛矿层、电极	12.2% (64 cm ²)
喷墨沉积	能	低	好	ETL、HTL、钙钛矿层、电极	只有电池数据，无组件产品

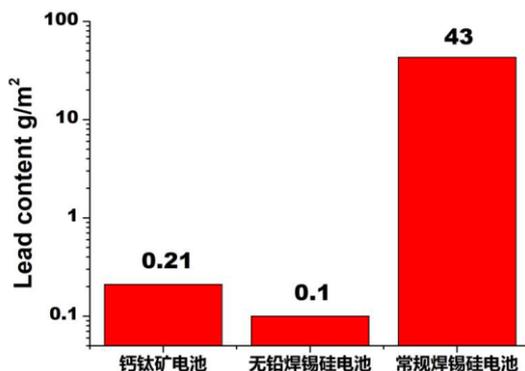
资料来源：网络资料，东方证券研究所

铅污染—看似无解，其实可控

潜在的铅污染是钙钛矿电池另一处被诟病的缺点。钙钛矿材料中含有重金属元素铅，对人体健康有一定损害，并且钙钛矿材料遇水即溶解，因此行业内外对此都抱有一定担忧。但定量来看，每平米钙钛矿组件含铅量仅有 0.2g，远远低于常规焊锡硅电池。此外，根据国家相关标准（GB15618-2018），农业用地含铅量在 80-200mg/kg 才会进入筛选范畴，即使钙钛矿组件全部溶解进入地表，每平米影响的铅浓度不足 1mg/kg（每平米土壤厚 10 厘米，重约 250kg），污染微乎其微。

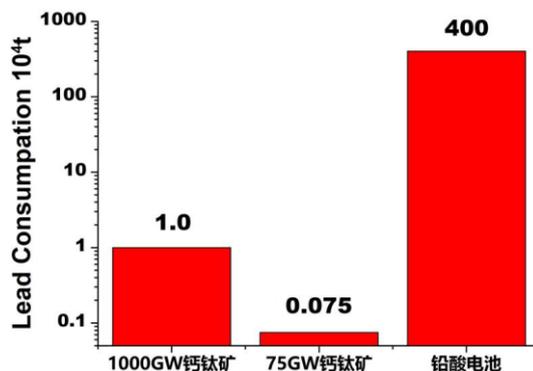
横向对比来看，钙钛矿电池的含铅量低于常规硅电池，更低于铅酸电池 2 个数量级以上，因此，钙钛矿电池引起的铅污染影响总体可控。

图表 65：钙钛矿电池的单位含铅量水平较低



资料来源：中国物理学会期刊网，东方证券研究所

图表 66：钙钛矿电池的远期铅用量远低于铅酸电池现有规模



资料来源：中国物理学会期刊网，东方证券研究所

同时，科研人员也在致力于减少电池中铅的用量，甚至完全用无污染材料对其替代，并已取得一定成果。目前，采用锡元素代替铅作为中心原子的电池效率已经达到 7% 以上，尽管在器件效率和稳定性上较铅基电池仍然存在较大差距，但也为无铅电池的前景探索出一条可以尝试的道路。

代表企业：产业化道路仍在探索，绑定优质设备商或是关键

目前，全球至少有四十个国家，数十家企业从事对钙钛矿电池实用化的研究，但基本处于商业化的早期阶段。各公司以研发为主，未形成成熟的产业链和行业格局。国际上有英国的牛津光伏、波兰的 Solliance、瑞士的 Solaronix、澳大利亚的 Dyesol、英国的 G24 Innovations、以色列的 3G Solar、爱尔兰的 Solar Print 等；其中牛津光伏被评为“2017 年度全球最具创新力 50 家公司”之一，是目前钙钛矿及叠层电池产业化的领军企业。国内企业同样都处于商业化早期阶段，其中表现较为突出的是协鑫集团旗下的苏州协鑫纳米科技和杭州纤纳光电。

图表 67：目前全球进展较快的钙钛矿企业情况简介

公司名称	组件参数	备注
Oxford PV (英国)	28% (1cm ²)	硅基叠层电池，真空镀膜工艺
Solliance (波兰)	13.8% (144cm ²)	单结电池，柔性卷对卷工艺
纤纳光电	17.9% (277cm ²)	单结电池，已获三峡资本注资
协鑫纳米 (厦门惟华)	10.3% (2800cm ²)	2015 年被协鑫收购
万度光能 (湖北)	16%+	华中科技大学团队，有 110m ² 印刷组件组件试验
众能光电	16.63% (159cm ²)	华中科技大学衍生团队
黎元科技	14.8% (64cm ²)	上海交通大学韩礼元团队

资料来源：网络资料，东方证券研究所

应当指出的是，钙钛矿电池卓越的材料特性使得进入该领域的技术和资金壁垒远远低于第二代无机薄膜电池，成套产线设备销售可能是更有前景的业务。因此对于各家初创企业而言，一方面要解决稳定性等根本的学理问题，但更重要的要尽快实现实验室成果向产业化成果的转化，低成本、大面积镀膜工艺本质上是工程问题，强大的工艺设备研发能力比材料研发能力更加重要。万度、黎元等初创公司已经将钙钛矿材料、设备等作为未来发展的主业之一了，牛津光伏更是引入知名的光伏设备商美耶博格作为战略股东，加快钙钛矿电池的产业化进程。

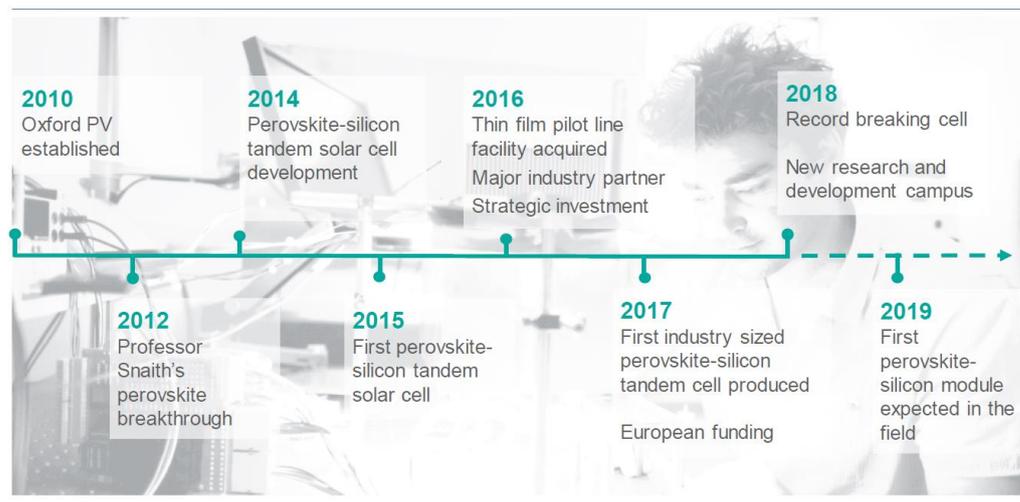
牛津光伏：金风科技领投的钙钛矿领航者，绑定梅耶博格聚焦叠层电池

牛津光伏（Oxford PV）成立于 2010 年，创始人包括全球知名的太阳能电池学者 Henry Snaith 教授，早期的研发重心是有机太阳能电池的产业化。2012 年 Snaith 团队的钙钛矿电池研究获得突破，公司随即将研发重心转向钙钛矿。目前公司在英国、德国设立两大研发中心，共有研发人员约 90 人，并有超过 200 项专利授权，是目前钙钛矿电池领域研发实力最强的领军企业。

牛津光伏早在 2014 年即确定了钙钛矿/晶硅叠层电池的研究方向，并在之后的几年里进行了 4 轮融资，推进叠层电池产线的产业化。2019 年 3 月，公司宣布完成 D 轮融资，共筹集了 3100 万英镑（4100 万美元/3630 万欧元），由中国风机龙头金风科技领投，并获得了挪威石油和天然气公司 Equinor ASA(NYSE:EQNR)等现有股东的资金支持，至此，这家英国公司在过去五年里共筹集了超过 1 亿美元，资金实力远超其他初创企业。

几乎在同时，光伏设备龙头美耶博格宣布与牛津光伏进行战略合作，梅耶博格发行 6629 万新股（占目前梅耶博格上市股本的 9.99%）实现在牛津光伏持股 18.8%，从而成为牛津光伏的第一大股东。此外，梅耶博格还被允许在合作研发协议期间增持牛津光伏等同于 31.6% 资本价值的股权及牛津光伏 24.0% 的选举权。

图表 68：牛津光伏公司发展历程

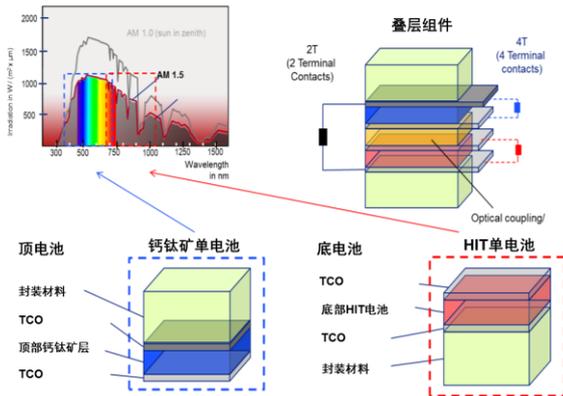


资料来源：Oxford PV，东方证券研究所

根据双方协议，双方致力于将梅耶博格的异质结技术（HIT）、智能网栅连接技术（SWCT™）牛津光伏的钙钛矿太阳能电池技术相结合，新的叠层电池理论效率可到 43%，较晶硅电池理论极限

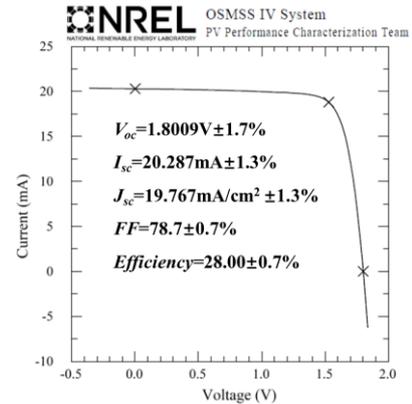
效率高出 50% (29%)。与传统晶硅电池相比，HIT 与钙钛矿的结合效益更好，而技术难度更低，原因一是传统电池上表面的绒面结构使得钙钛矿薄层的成膜质量受到严重影响，二是异质结电池可以与钙钛矿电池共用一层 TCO 薄膜，从而降低成本。此外，目前 HIT 电池推广不力的一大原因是其量产的能量转换效率较 PERC 仅高出 1 个百分点左右，而成本高出 1 倍以上，与钙钛矿的结合有望将效率优势拉开至 4 个百分点以上，为赢得性价比优势注入强心剂。

图表 69：梅耶博格计划推出的 HIT/钙钛矿叠层电池结构



资料来源：梅耶博格，东方证券研究所

图表 70：牛津光伏叠层电池的认证效率高达 28%



资料来源：Oxford PV，东方证券研究所

梅耶博格将向牛津光伏出售一条 200 MW 的异质结生产线用于钙钛矿电池的试生产，此生产线将于 2020 年底在牛津光伏哈弗河畔勃兰登堡的工厂中试运行，该试生产线电池转换率的初始目标为 27%。梅耶博格还将研发用于钙钛矿叠层沉积至 HJT 底电池上的大规模工业化生产设备，这将进一步加速投入市场的步伐，并扩大牛津光伏及梅耶博格在全球太阳能行业作为钙钛矿-异质结技术领导者的优势。

苏州协鑫/厦门惟华：国内钙钛矿产业化先驱，背靠协鑫实力不容小觑

苏州协鑫纳米科技的前身是厦门惟华光能。公司成立于 2010 年，2013 年开始钙钛矿光伏组件技术开发，是国内最早从事钙钛矿电池产业化的初创企业，2014 年惟华小电池的能量转换效率便达到 19%。2016 年底协鑫集团并购厦门惟华，同时开始在苏州建设 10MW 级别钙钛矿组件中试线，所用的组件尺寸为 45cm*65cm，光电转化效率达到 15.3%。2017 年底，中试产线建设完成；2018 年底，中试生产线相关工艺开发完成，目前公司开始筹建 100MW 量产生产线，届时组件面积将扩大到 1m*2m，转换效率预计提高至 18% 以上，电池成本有望降至 1 元/W 以下。

依托惟华近 10 年薄膜电池研发经验以及协鑫集团在光伏产业链上的强大布局，协鑫纳米是国内目前钙钛矿产业进展最领先的企业之一，目前公司的中试线和试验组件均已投入使用。此前的各种光伏电池及组件技术，都是在国外完成全部技术开发之后再引入全套生产设备在国内生产，普通晶硅、PERC、HJT、非晶硅、CIGS、CdTe 莫不如是；而钙钛矿技术，是中国企业第一次从材料、设备到工艺全面实现自主研发的产物。大面积钙钛矿组件生产工艺开发的成功，标志着中国的光伏产业正式从技术的追随者变成了引领者。

除了大面积单结组件，协鑫纳米也在探索与晶硅电池的结合。协鑫集团是全球晶硅产业链布局最完整的龙头企业，全面覆盖多晶硅、硅片、电池片、组件及运营各环节，也积累了巨量的晶硅资产。

晶硅+钙钛矿叠层电池有望突破晶硅电池 S-Q 效率极限，将太阳能电池的能量转换效率推高至 25%甚至 30%的新高度，从而大幅降低光伏度电成本，并实现存量晶硅资产的保值增值。

图表 71：协鑫纳米生产的单结钙钛矿试验组件



资料来源：协鑫纳米，东方证券研究所

图表 72：协鑫纳米试验中的晶硅+钙钛矿叠层组件



资料来源：协鑫纳米，东方证券研究所

纤纳光电：钙钛矿电池超新星，获得三峡资本强力支持

纤纳科技成立于 2015 年，公司致力于新兴钙钛矿薄膜太阳能电池及相关设备的研发。纤纳光电研发的单结钙钛矿组件能量转换效率连续四次打破世界纪录，从 2017 年的 15.2%一路提升至 2018 年的 17.9%，组件面积达 17cm²，并获得国际权威认证机构 Newport 第三方独立认证，该记录到目前为止仍未被打破。纤纳光电在钙钛矿电池研发、生产和监测领域申报了 90 多项知识产权专利，其产品为智慧城市、绿色建筑、多能互补建设提供灵活多样的新光伏智能解决方案。

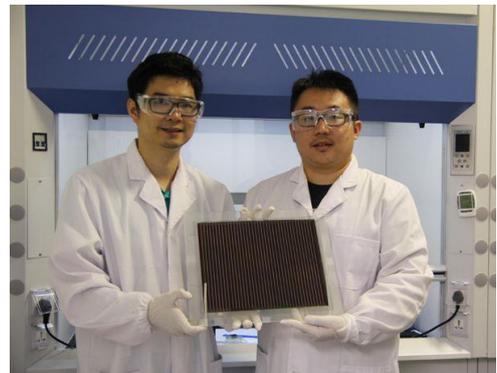
2019 年 4 月，中国长江三峡集团旗下三峡资本控股有限责任公司宣布以战略投资者身份注资纤纳光电，三峡集团是我国乃至全球资产最大的清洁能源供应商之一，由于传统水电业面临增长瓶颈，近年来三峡集团加大了在风电、光伏等新型清洁能源的布局，此次战略入股，对于纤纳科技在资金和市场两方面都将提供巨大的支持。

图表 73：纤纳科技制备的钙钛矿小组件效率连续打破世界纪录



资料来源：公司网站，东方证券研究所

图表 74：纤纳科技创始人展示公司钙钛矿组件产品



资料来源：公司网站，东方证券研究所

总结：份额止跌回升，长期内有望走出超级巨头

我们认为，晶硅电池在连续经历了多晶硅国产替代、单晶替代和 PERC 革命之后，阶段性地进入降本瓶颈期，而薄膜电池经过最近七八年的积累，有望进入新一轮份额上升的通道。

份额：First Solar 扩产计划明确，钙钛矿公司跃跃欲试

碲化镉电池的崛起确定性最好。在 First Solar 的强力带动下，CdTe 电池成本持续下降，产能和出货量近期内将再度高增长。如果 First Solar 能够如期完成产能建设，**2021 年 CdTe 电池的出货量有望达到 8GW 以上，市占率提升至 5% 以上**；此外，龙焱能源经过几年稳健发展，也开始逐步放大产能，预计到 2021 年龙焱及其相关企业的产能有望达到 200MW。

钙钛矿电池目前获得了越来越高的关注度。目前，牛津光伏与梅耶博格已经规划 2020 年完成 200MW HIT+钙钛矿异质结产线的试运行，协鑫据称已完成了 10MW 的试产线，100MW 的量产线已在建设当中，计划到 2020 年实现商业化量产；纤纳科技也正在为钙钛矿电池的量产做最后准备，组建全球首条 20MW 钙钛矿太阳能电池生产线。尽管商业化前景仍不明朗，但考虑到钙钛矿相对较低的技术门槛和扩张难度，一旦明确了商业化路径，钙钛矿电池有可能掀起一轮真正的电池革命。

未来走势：碲化镉行业先发优势突出，钙钛矿想象空间无限

与晶硅电池相比，薄膜电池的技术特点决定了其行业属性的特殊性，CdTe 电池的行业属性呈现如下特点：

首先，CdTe 薄膜电池的核心技术都掌握在电池生产企业手里。晶硅电池技术和产业链都已经相当成熟，市场竞争充分，即使是龙头企业也无法将研发优势转化为可持续的成本优势，晶硅电池成本的下降主要依赖规模效应、持续的生产效率提升和阶段性的技术进步，因此晶硅产业迭代很快，迄今为止甚至没有一家企业能将竞争优势维持 5 年以上。目前仅存的几家薄膜电池企业各自都拥有完全知识产权的技术体系，甚至生产设备也是独立设计、定制，因而行业进入壁垒极高，在光伏总需求持续增长的情况下，薄膜电池的企业数量反而呈减少趋势。

其次，CdTe 薄膜电池主要通过技术提升而不是大量的资本投入来降低成本。晶硅电池设备商通过不断提升生产效率以及改善产品性能，设备的代际更迭迅速，而且从上游硅料到下游电池更新的速度越来越快，依靠技术积累和成本管控降本远远不及更新产线有效，因此晶硅企业需要大量的资本投入不断建设新产能以维持性价比优势。由于折旧的成本占比高，薄膜电池的产能投放之后，可以通过提升生产节拍和组件效率快速降低生产成本，这两大路径都依赖电池企业薄膜沉积工艺的进步，这不是依靠资本投入可以快速实现的，2012-2017 年期间 First Solar 在没有大额资本开支的情况下，生产成本仍然下降了近 1 半。

因此，与晶硅电池产业链后发优势的特点不同，**CdTe 薄膜电池是典型的先发优势行业。**和 First Solar 同时起步的晶硅企业或者已经沦落，甚至已经破产，First Solar 的薄膜电池竞争对手反而在不断退出。从另一个角度看，薄膜电池越来越高的进入壁垒也限制了其份额提升的速度，中短期内，CdTe 薄膜电池的市场份额几乎完全取决于 First Solar 一家企业的产能规划，CdTe 电池对于晶硅的冲击应该有限，但在这一小块份额中有望成长出体量巨大的龙头企业。

钙钛矿电池由于迥异的技术特点，行业特性也会有其特殊之处：

首先，钙钛矿电池技术壁垒极低。目前全球至少有上千家科研院所和企业机构从事钙钛矿电池研发，尽管实验条件天差地远，但多数研究的转换效率都能达到 18% 甚至 20% 以上，这表明在电池效率层面，各路竞争者几乎难以建立起非常牢固的竞争优势。有可能拉开差距的地方在于电池寿命，但这取决于最终的解决方案——如果是科学机理上的突破，全行业将普惠性受益；如果是工程学上的进展，领军者或能维持一段时间的优势。

其次，钙钛矿电池的可能性极其多元。在材料选择上，不仅存在数十种界面功能材料，甚至钙钛矿材料本身也有很多组分调节的组合；在工艺路线上，无论是液相法、还是蒸镀法，或者是别的沉积工艺，都能以很低的成本制备出性能优越的电池器件；在发展路线上，钙钛矿电池既具备独立挑战晶硅电池的潜力，也可以和晶硅携手打造出超高效率的叠层电池；在应用场景上，钙钛矿电池既可作为传统的发电系统，也可以用在诸如 BIPV、可穿戴设备等各种场景中。

到目前为止，我们仍很难想像钙钛矿电池最终会以何种特定的路径发展，它很可能衍生出多元的细分市场，企业优先的战略选择可能不是成本领先而是差异化。但在这个产业真正落地生根之前，我们建议多关注企业的工程设计能力而非研发能力，那些能率先将研发落实到产品、开拓出新市场的企业是当前时点值得高看一眼的希望之星。

投资建议：碲化镉看龙头，钙钛矿观变化

薄膜电池在下滑多年之后有望迎来向上的拐点，在众多技术路线中我们认为 CdTe 电池和钙钛矿电池的前景最好。由于 A 股没有纯粹的薄膜电池企业，我们建议关注海外标的和相关概念股。

CdTe 电池的先发优势明显，建议关注目前行业内仍有盈利能力的龙头企业。海外标的建议关注美国的 First Solar (FSLR)，First Solar 是全球最大的薄膜电池企业，2018 年出货量 2.7GW。根据公司披露，公司目前在手订单量已达 11GW 以上，2019/2020 年出货量有望达到 5.5/8GW，保持高速增长。随着 S6 产线布局完成，First Solar 的 CdTe 电池产品再度具备挑战晶硅成本的能力，组件盈利能力有望大幅回升，甚至可能接近 2012 年前的水平（40%左右）；此外，First Solar 还是美国最大的电站 EPC 承包商之一，该项业务也将为公司业绩提供强大支撑。

国内非上市企业建议关注龙焱能源科技。龙焱能源是我国唯一能够量产 CdTe 组件的薄膜电池企业，公司目前有 80MW 产能，产品主要用于 BIPV 市场，同时具备向传统发电市场延伸的能力。公司拥有完全自主知识产权的技术体系，全面掌握产线的设计、定制以及高效产品的生产工艺，并且具备对外输出整套产线的能力。尽管目前规模仍然较小，但公司秉持“先强后大”的理念，前景可期。

钙钛矿电池现在有众多企业从事相关研究，产业化进程仍不明朗，**我们建议关注工业基础与研发实力兼具的优质企业。**海外建议关注金风科技领投的牛津光伏，牛津光伏的技术团队由全球钙钛矿领域最顶尖的科学家 Henry Snaith 领衔，现在又与电池设备龙头梅耶博格战略合作，其工艺研发和设备设计能力在全球首屈一指，双方合作的全球第一条 200MW 异质结+钙钛矿叠层电池产线有望在 2020 年底投入运行；值得一提的是，**我国风机设备龙头金风科技领投了 D 轮，现在已是牛津光伏最大的股东之一，钙钛矿电池有望成为金风科技从风机龙头迈向综合型清洁能源设备的重要布局。**

国内创业公司建议关注协鑫纳米和纤纳光电。协鑫纳米的核心研发团队是国内从事第三代薄膜电池产业化的先驱，2016 年被光伏全产业链龙头协鑫集团收购，之后产业化进程加速，目前已建成 10MW 单结组件的试验线，组件效率高达 15.3%，100MW 中试线也在建设之中，达产后组件成本有望降至 1 元/W 以下，成本优势突出。协鑫纳米目前仍在集团内部培育，建议关注协鑫集团最主要的上市平台公司保利协鑫能源集团。

纤纳光电是近年来崛起的钙钛矿电池初创企业，公司成立仅 3 年，已多次创造钙钛矿小组件能量转换效率的世界纪录，最新纪录（17.9%）也由其创造。纤纳光电最近获得三峡资本战略入股，资金实力和下游市场开拓均有所加强，目前中试线在紧锣密鼓的筹建当中，公司有望成为国内乃至全球单结钙钛矿组件最早量产的企业之一。

风险提示

- **CdTe 电池降本不及预期。**CdTe 电池提效和增大尺寸是降低组件成本最有效的两大手段，近年来电池和组件效率提升遭遇瓶颈，如果停滞不前一方面不利于成本下降，另一方面与晶硅电池的效率差距过大会导致定价过低；增大尺寸发挥规模效应是目前降本最可靠的手段，该路线根本上是要提升薄膜沉积工艺，这方面技术难度很高，存在推进不力的风险。
- **钙钛矿产业化推进不及预期。**钙钛矿电池的稳定性和低成本的生产工艺是产业化必须解决的两大问题，稳定性方面迄今为止仍未有令人信服的成果出现，生产工艺的研发方向也尚未明确，这些可能导致钙钛矿电池产业化进程低于预期。

分析师申明

每位负责撰写本研究报告全部或部分内容的研究分析师在此作以下声明：

分析师在本报告中对所提及的证券或发行人发表的任何建议和观点均准确地反映了其个人对该证券或发行人的看法和判断；分析师薪酬的任何组成部分无论是在过去、现在及将来，均与其在本研究报告中所表述的具体建议或观点无任何直接或间接的关系。

投资评级和相关定义

报告发布日后的 12 个月内的公司的涨跌幅相对同期的上证指数/深证成指的涨跌幅为基准；

公司投资评级的量化标准

- 买入：相对强于市场基准指数收益率 15%以上；
- 增持：相对强于市场基准指数收益率 5%~15%；
- 中性：相对于市场基准指数收益率在-5%~+5%之间波动；
- 减持：相对弱于市场基准指数收益率在-5%以下。

未评级 —— 由于在报告发出之时该股票不在本公司研究覆盖范围内，分析师基于当时对该股票的研究状况，未给予投资评级相关信息。

暂停评级 —— 根据监管制度及本公司相关规定，研究报告发布之时该投资对象可能与本公司存在潜在的利益冲突情形；亦或是研究报告发布当时该股票的价值和价格分析存在重大不确定性，缺乏足够的研究依据支持分析师给出明确投资评级；分析师在上述情况下暂停对该股票给予投资评级等信息，投资者需要注意在此报告发布之前曾给予该股票的投资评级、盈利预测及目标价格等信息不再有效。

行业投资评级的量化标准：

- 看好：相对强于市场基准指数收益率 5%以上；
- 中性：相对于市场基准指数收益率在-5%~+5%之间波动；
- 看淡：相对于市场基准指数收益率在-5%以下。

未评级：由于在报告发出之时该行业不在本公司研究覆盖范围内，分析师基于当时对该行业的研究状况，未给予投资评级等相关信息。

暂停评级：由于研究报告发布当时该行业的投资价值分析存在重大不确定性，缺乏足够的研究依据支持分析师给出明确行业投资评级；分析师在上述情况下暂停对该行业给予投资评级信息，投资者需要注意在此报告发布之前曾给予该行业的投资评级信息不再有效。

免责声明

本研究报告由东方证券股份有限公司（以下简称“本公司”）制作及发布。

本研究仅供本公司的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。本报告的全体接收人应当采取必备措施防止本报告被转发给他人。

本报告是基于本公司认为可靠的且目前已公开的信息撰写，本公司力求但不保证该信息的准确性和完整性，客户也不应该认为该信息是准确和完整的。同时，本公司不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的证券研究报告。本公司会适时更新我们的研究，但可能会因某些规定而无法做到。除了一些定期出版的证券研究报告之外，绝大多数证券研究报告是在分析师认为适当的时候不定期地发布。

在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需求。客户应考虑本报告中的任何意见或建议是否符合其特定状况，若有必要应寻求专家意见。本报告所载的资料、工具、意见及推测只提供给客户作参考之用，并非作为或被视为出售或购买证券或其他投资标的的邀请或向人作出邀请。

本报告中提及的投资价格和价值以及这些投资带来的收入可能会波动。过去的表现并不代表未来的表现，未来的回报也无法保证，投资者可能会损失本金。外汇汇率波动有可能对某些投资的价值或价格或来自这一投资的收入产生不良影响。那些涉及期货、期权及其它衍生工具的交易，因其包括重大的市场风险，因此并不适合所有投资者。

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所引致的任何损失负任何责任，投资者自主作出投资决策并自行承担投资风险，任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

本报告主要以电子版形式分发，间或也会辅以印刷品形式分发，所有报告版权均归本公司所有。未经本公司事先书面协议授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，不得将报告内容作为诉讼、仲裁、传媒所引用之证明或依据，不得用于营利或用于未经允许的其它用途。

经本公司事先书面协议授权刊载或转发，被授权机构承担相关刊载或者转发责任。不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

提示客户及公众投资者慎重使用未经授权刊载或者转发的本公司证券研究报告，慎重使用公众媒体刊载的证券研究报告。

东方证券研究所

地址：上海市中山南路 318 号东方国际金融广场 26 楼

联系人：王骏飞

电话：021-63325888*1131

传真：021-63326786

网址：www.dfzq.com.cn

Email：wangjunfei@orientsec.com.cn

