

太空光伏研究专题

逐梦航天，太空光伏技术与市场前景展望

行业研究 · 行业专题

太空光伏 · 价值分析

投资评级：优于大市

证券分析师：王蔚祺

010-88005313

wangweiqi2@guosen.com.cn

S0980520080003

证券分析师：李恒源

021-60875174

lihengyuan@guosen.com.cn

S0980520080009

证券分析师：袁阳

0755-22940078

yuanyang2@guosen.com.cn

S0980524030002

- 太空光伏原指将光伏发电系统部署于太空环境，如卫星、空间站等航天器等所使用的光伏技术，其核心应用是为航天器自身供电，未来亦可拓展其他用途。随着商业航天与太空算力的发展，2025年以来产业界对太空光伏的关注度激增。低轨星座卫星进入“千颗-万颗”级别，在国际电信联盟（ITU）“先占先得”规则下，美国Starlink、中国星网、美国亚马逊等必须在2030年前完成批量部署，卫星数量指数级上升，而卫星的能源系统成为“交付瓶颈”。另一方面，以Space X为代表的商业航天企业不断降低发射成本，使得在太空布局算力成为可能，中远期太空光伏需求进一步打开。
- **极高的可靠性、稳定性与轻量化是对太空光伏电池的核心要求。**太空光伏所处环境与地面显著不同，对光伏组件性能要求远超地面应用。目前太空光伏电池的主流技术路线仍以砷化镓系多结电池为核心，成本和资源限制了大规模应用。晶硅异质结（HJT）具有未来可规模化的工程成熟度，连同钙钛矿（含硅基叠层方案）路线具备面向太空的轻量化潜力。我们预测未来太空光伏技术路线主要分为三种，现役高价值在轨应用以砷化镓多结为主；晶硅在成本与成熟供应链上具优势、更多用于成本敏感或短寿命任务；钙钛矿（及钙钛矿-晶硅叠层）具备轻量化与效率上限潜力，是远期重要候选。
- 我们估算2025年发射入轨卫星对应的砷化镓电池产值超过80亿元，预计未来20年随着全球商业航天的高速发展以及太空算力和太空电站等新技术的创新，砷化镓市场规模将从约13MW增长到接近200MW，行业产值在未来逐步从100亿发展到产业中期的300亿元以及成熟期的接近千亿规模。我们预测HJT和钙钛矿基于太空算力和太空电站的容量需求，在产业中期可能从1GW增长到最乐观情景的每年39GW，市场产值从产业早期的161亿元发展到成熟期的5000亿元以上。
- 从市场格局来看，由于国内外低成本运载能力的缺乏，发射成本在未来3-5年无法达到大规模应用太空光伏的阶段，因此电池企业无法通过技术优势在当下建立规模护城河。对于未来的电池市场格局，我们倾向于预期多数参与者可能来自航天体系和电池设备制造商；而非完全延续地面光伏电池行业的传统格局，同时核心辅材的生产制造和关键工艺可能被太空光伏电池企业一体化发展。（相关企业梳理信息详见报告正文）
- 投资建议：建议关注光伏板块重点设备企业，以及在宇航电源有光伏产品布局的企业，以及光伏头部辅材企业。
- 风险提示：航天科技与市场发展不及预期，太空光伏技术研发进展不及预期。

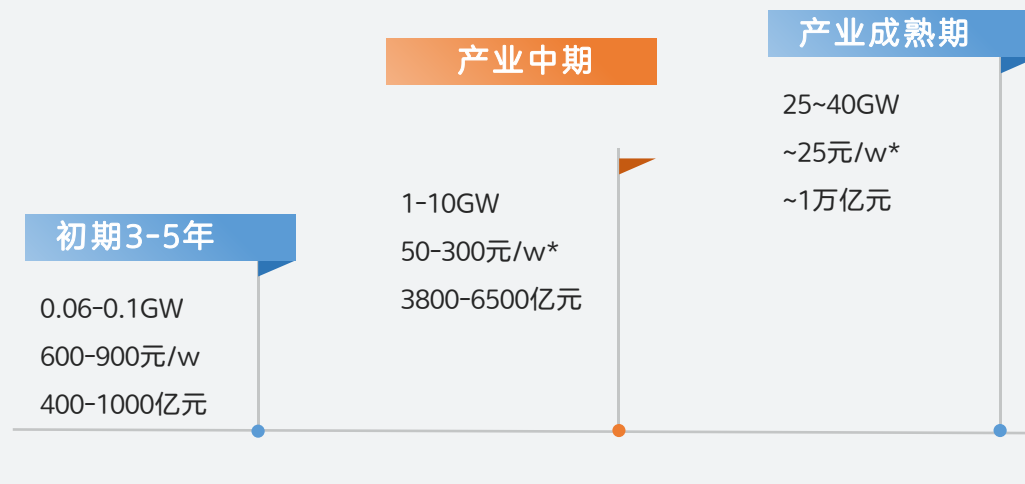
一、太空光伏市场前景分析

太空光伏发展现状与前景综述

- 太空光伏原指将光伏发电系统部署于太空环境，如卫星、空间站等航天器等所使用的光伏技术，其核心应用是为航天器自身供电，未来亦可拓展其他用途。当前主流的应用技术为三结砷化镓太阳能电池，与地面电站所采用的晶硅技术路线存在较大差异，砷化镓销售单价高达900元-1300元/w，而当前地面电站所应用的晶硅光伏组件价格仅为0.8-1元/w，价格相差千倍。
- 随着商业航天与太空算力的发展，2025年以来产业界对太空光伏的关注度激增。低轨星座卫星进入“千颗-万颗”级别，在国际电信联盟（ITU）“先占先得”规则下，美国Starlink、中国星网、美国亚马逊等必须在2030年前完成批量部署，卫星数量指数级上升，而卫星的能源系统成为“交付瓶颈”。另一方面，以Space X为代表的商业航天企业不断降低发射成本，使得在太空布局算力成为可能，中远期太空光伏需求进一步打开。
- 从前沿角度看，太空光伏概念已扩展至在太空部署大型光伏阵列，通过微波或激光形式将捕获的太阳能传输至地面接收站，转化为电能后接入电网。
- 目前太空光伏电池的主流技术路线仍以**砷化镓系多结**电池为核心，成本和资源限制了大规模应用。晶硅异质结（HJT）具有未来可规模化的工程成熟度，连同钙钛矿（含硅基叠层方案）路线具备面向太空的轻量化潜力。
- 钙钛矿叠层电池AM0效率可达30-45%，同时能质比更高、抗辐射与温度系数表现较强，并具备柔性/折叠潜力，更契合太空场景对高功率密度与轻量化的长期需求。钙钛矿太空光伏组件即将进入在轨验证阶段，远期渗透率将不断提高。

图1：太空光伏与地面电站光伏（硅基）市场比较

2025年	太空光伏（砷化镓）	地面光伏（晶硅）
2025年销售单价	900-1500元/w	0.7-1.2元/w
2025年新增容量	约9-10MW	620 GW*
2025年市场规模	80-90 亿元	4200-4640 亿元



资料来源：地面光伏数据来自CPIA 太空光伏展望数据来自钧达股份、Space X，太空光伏未来发展容量和市场规模为国信证券经济研究所预测。注：1GW=1000 MW，*未来的价格数据仅代表**非砷化镓**的太阳能发电技术路线，假设砷化镓路线价格稳定在700-800元/W。

太空光伏应用场景多样，需要导入大规模低成本方案

- 从需求端看，太空光伏的应用场景可归纳为五大类：（1）航天器平台供电，包括各类卫星的主电源；（2）在轨大型平台基础设施，包括空间站/商业在轨平台等连续运行与冗余供电；（3）深空探索与太阳电推进，高功率太阳阵列直接决定推进能力与任务边界；（4）月面/行星表面电力系统，需要满足长期驻留、表面基地与ISRU等对稳定供电与环境适配的需求；（5）新型空间能源基础设施，包括对地供能的空间太阳能电站SBSP，以及轨道数据中心/太空AI算力等远期场景。这些场景共同推动太空光伏从“卫星子系统”走向“空间基础设施的关键底座”，并将技术演进聚焦到更高比功率、更强可靠性与更强可扩展部署能力上。
- 分场景看，卫星主电源、在轨大型平台、深空任务的光伏应用已成熟并实现规模应用，以航天级砷化镓多结电池为主，因为其抗辐照与寿命可靠性最强，适合高价值、长寿命任务。但随着卫星批量化发射需求爆发以及月面基地/空间站场景需求下，砷化镓多结电池成本高、原料供应有限难以大规模应用。为了实现轻量化、大面积部署的同时控制成本，钙钛矿和晶硅HJT凭借其薄膜柔性与其叠层增效潜力，最有可能从中长期脱颖而出。
- 钙钛矿技术在太空光伏的落地趋势：优先从低风险、短寿命、技术验证型在轨任务切入，逐步走向更高价值、长寿命平台。

表1：太空光伏应用场景及需求

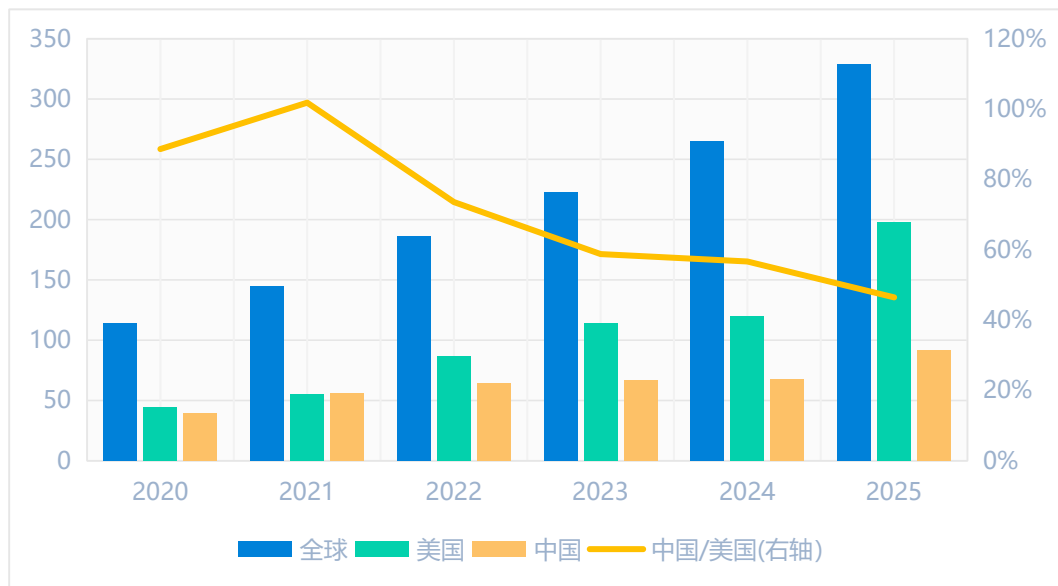
应用场景	典型载体	需求特征
航天器平台供电	通信/遥感/导航卫星，小卫星星座等	从W级到10kW+；稳定、长寿命， 亟需开发低成本新技术方案。
大型在轨平台基础设施	空间站、商业舱段、在轨实验平台等	10-100kW；连续运行与冗余；可维护与可扩展
深空探索与太阳能电推进	深空探测器、月球门户Gateway PPE（动力与推进元件）等	高功率密度+长寿命
月面/行星表面电力	月面探测、科研站、资源开采/ISRU（远期）	从早期kW级向更高功率发展；环境适配+微电网协同， 亟需开发低成本新技术方案。
空间能源基础设施形态	SBSP对地输电；轨道数据中心/太空AI算力等	大规模，远期“对地供能”；在轨算力：需求上限推向MW级，仍处早期验证/路线图阶段 亟需开发低成本新技术方案。

资料来源：NASA，ESA，Crusoe公司官网，国信证券经济研究所整理

全球航天产业进入产业化加速阶段

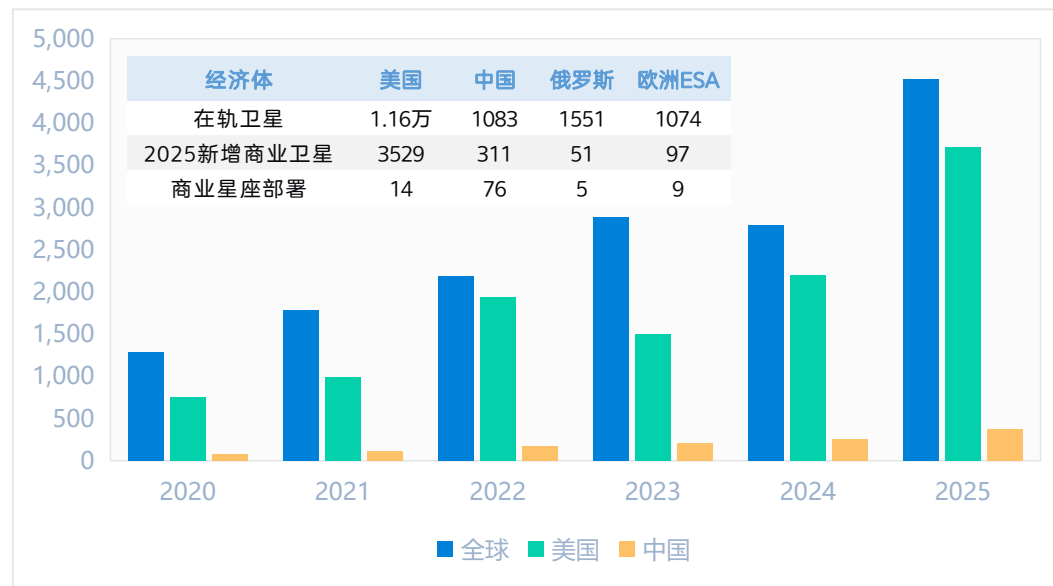
- 全球商业航天正从“技术可行性验证”迈向“规模化交付与商业闭环”新阶段。2010至2019年，全球年均入轨卫星266颗；至2020年，技术进步与产业链发展促使进入空间门槛持续降低，低轨星座建设提速，发射频次与在轨资产规模显著增长。至2025年，全球年发射频次已增至329次，当年入轨卫星数量达4522颗，其中商业航天入轨卫星占比由2019年前的35%跃升至80%以上，成为世界航天产业的主要构成和增长驱动因素。
- 全球商业航天呈现“头部集中、增量分化”的格局：美国与中国稳居“领先者”之列。从发射能力看，2025年美中商业发射次数合计超200次，占全球商业发射总次数的98%以上，发射成功率均稳定在95%以上，配套航天发射场数量合计逾15个，构建起全球最核心的发射基础设施网络。在轨资产与星座建设方面，两国在轨卫星总数超12000颗，占全球在轨卫星总量的75%以上；年度新增商业卫星合计逾3800颗，几乎包揽全球新增卫星份额。

图2：全球历年火箭发射次数（截至2025年底）



资料来源：泰伯智库，国信证券经济研究所整理

图3：全球历年卫星入轨数量（颗，截至2025年底）



资料来源：泰伯智库，国信证券经济研究所整理

低轨大规模星座成为全球布局焦点

- 根据国内外航天权威机构评估，全球低轨卫星总容量约 6-10 万颗，安全运营上限约6万颗。全球商业航天领域科技创新集中涌现，进而推动了商业航天的持续、快速发展，以Space X为代表的企业纷纷推出新型卫星产品和服务，为全球用户提供更加高效、精准的通信、遥感监测和导航定位服务，低轨大规模星座需求快速发展，数以万计的星座建设规划正在抢占有限的低轨资源。

表2：太空光伏应用场景及需求

星座名称	所属国家	规划卫星数	已发射/在轨	建设阶段	运营公司
Starlink（星链）	美国	42,000颗	10,839颗发射	商业化运营	Space X
GW星座（中国星网）	中国	12,992颗	179颗	规模化组网初期	中国卫星网络集团
千帆星座（G60星链）	中国	15,000+颗	112颗	一期组网中	上海垣信卫星
Kuiper（Amazon Leo）	美国	7,740颗	212颗	原型验证阶段	Amazon
OneWeb	英国/欧洲	2,648颗	656颗	商业化运营初期	OneWeb/空客
Telesat Lightspeed	加拿大	198颗		原型验证阶段	Telesat
银河航天星座	中国	1,000颗	35颗	早期组网	银河航天（民营）
吉林一号	中国	1,734颗	144颗	商业化运营	长光卫星

资料来源：泰伯智库，各公司官网，国信证券经济研究所整理。注：数据截止时间为2025年底，实际情况以企业披露为准。

太空算力类星座是世界航天发展的新方向

- Space X于2026年1月30日向美国联邦通信委员会（FCC）提交申请，计划部署多达100万颗卫星以构建一个太阳能驱动的“轨道数据中心”，旨在为全球人工智能（AI）应用提供算力支持。马斯克认为，当前AI芯片生产呈指数级增长，但电力供应增长缓慢，且地面数据中心耗电量大、冷却成本高，严重制约了AI算力发展。太空拥有近乎无限的太阳能和接近绝对零度的极佳散热环境，能大幅降低能耗与维护成本。
- 太空算力类星座也是我国航天发展的新方向。2026年2月之江实验室也宣布全球首个太空算力星座在中国建成并具备实用化服务能力。通过在太空部署计算节点，利用太空真空超低温环境实现高效散热，提供强大的在轨算力与数据存储能力，支撑6G、数字孪生、元宇宙等新兴领域发展，打造空天一体的算力网络。截至2026年1月底，我国已规划建设6个太空算力星座。

表3：我国算力星座梳理

星座名称	计划发射卫星数	已发射卫星数	运营商/主导单位	核心定位
银河航天算力星座	120颗（分三期部署）	8颗试验星	银河航天	在轨算力调度，支撑星地协同计算、6G空天一体化网络
中国星网空天算力星座	288颗	12颗（算力试验星）	中国卫星网络集团有限公司	国家级空天算力基础设施，实现全球算力无缝调度
行云算力星座	60颗	5颗	航天科工集团	算力与物联网融合，为工业互联网提供在轨数据处理服务
星时代算力星座	96颗	6颗	星时代宇航	应急算力保障，结合遥感数据实现在轨快速分析与响应
中科星图算力星座	72颗	4颗	中科星图	遥感数据在轨算力处理，提升时空信息服务效率
中国移动空天算力星座	192颗	0颗	中国移动	算力与5G/6G融合，构建天地一体算力网络，服务数字经济

资料来源：行业媒体《航天情报局》，国信证券经济研究所整理

二、太空光伏行业梳理

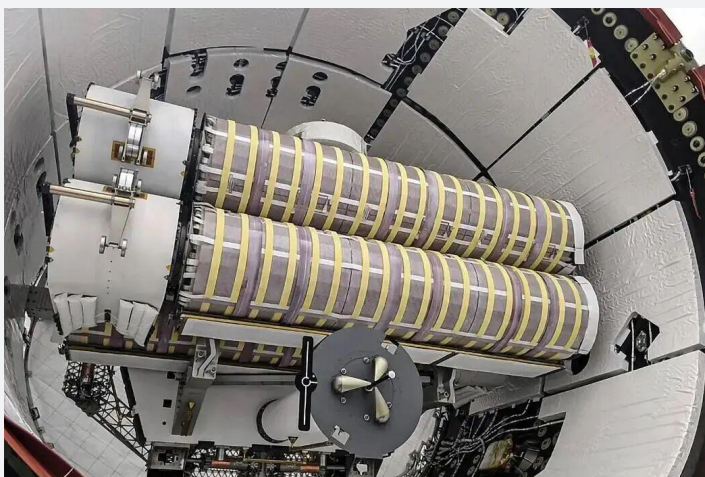
图4：太空光伏应用场景与技术路线

砷化镓技术（当前主流）

折叠式柔性太阳能翼



卷绕式柔性太阳能翼iROSA



晶硅P-HJT 技术（未来趋势之一）

柔性太空光伏电池

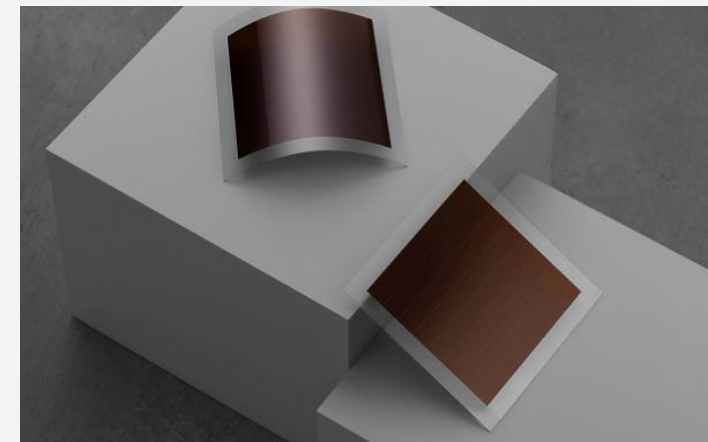


适配太空光伏电池的超薄硅片

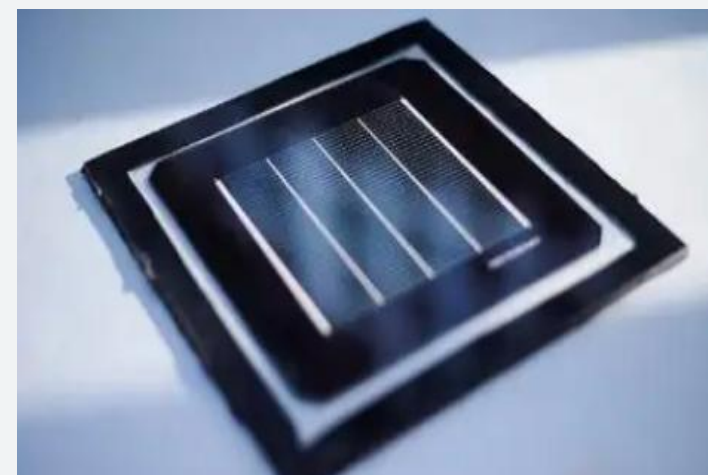


钙钛矿及叠层技术（未来趋势之一）

钙钛矿电池



钙钛矿晶硅叠层电池



资料来源：砷化镓技术来自Space X, NASA 公众号科学技术工程艺术数学；P-Hjt技术来自捷佳伟创，硅片来自高测股份；柔性钙钛矿电池图片来自Singfilm公司；叠层电池来自武汉爱疆科技。

请务必阅读正文之后的免责声明及其项下所有内容

单结钙钛矿及钙钛矿叠层电池是太空光伏潜力技术方向

- 太空光伏所处环境与地面显著不同，对光伏组件性能要求远超地面应用。一方面，组件长期暴露于高能粒子辐照如电子/质子与强紫外环境下，器件性能随寿命衰减并引入带电/电弧等风险；另一方面，航天器在日照与地影之间反复切换，组件经历频繁且幅度大的热循环，同时处于高真空条件下，对材料出气、界面粘结对封装稳定性提出更高要求；在近地轨道还需额外考虑原子氧侵蚀与微小碎片冲击等因素。
- 极高的可靠性、稳定性与轻量化是对光伏电池的核心要求，钙钛矿及钙钛矿/晶硅叠层电池是太空光伏潜力技术方向。太空光伏技术路线主要分为三种，现役高价值在轨应用以砷化镓多结为主；晶硅在成本与成熟供应链上具优势、更多用于成本敏感或短寿命任务；钙钛矿（及钙钛矿-晶硅叠层）具备轻量化与效率上限潜力，是远期重要候选。

砷化镓多结电池



成熟度：高，工程验证充分

核心优势：高效率、抗辐照、EOL可预测性强，适合长寿命与高可靠任务

存在问题：成本高，约900-1300元/W；全球砷化镓矿产资源与产能有限，难以支撑太空光伏需求

晶硅电池



成熟度：地面产业成熟度高

核心优势：制造体系成熟、成本相对可控、供给弹性强，其中HJT是面向轻量化与薄片化的潜在方向之一

存在问题：在单位质量功率、辐照后EOL保持等关键指标上较弱

钙钛矿及钙钛矿叠层电池



成熟度：低（处于验证/示范导入阶段）

优势与潜力：**薄膜属性→轻量化与柔性化**，有望提升阵列能质比W/kg与折叠体积效率，适配大面积展开阵列趋势；**带隙可调，转换效率高**，与晶硅叠层可提升W/m²上限，在同等面积输出更高功率或减少阵列面积/结构负担；太空高真空、低水氧环境有望弱化钙钛矿对湿度/氧气敏感带来的性能衰减劣势。


存在问题：长期稳定性、环境适应性以及工程化应用存在挑战。

关键门槛：空间工况下的真空/热循环/辐照综合可靠性与封装体系

太空光伏电池各技术路线分析

- 目前太空光伏电池的主流技术路线仍以砷化镓系多结电池为核心，成本限制其更大规模应用。多结砷化镓电池在AM0条件下实测效率可达30%-40%，同时具备更强的抗辐射/高能粒子能力、更优的温度系数以及良好的柔性/折叠适配性，因而在高可靠卫星与空间站等任务中占据主导；但其核心约束在于制造成本高，对应组件与系统成本显著高于其他路线。
- 晶硅HJT与钙钛矿路线分别对应可规模化的工程成熟度与面向太空的轻量化潜力。晶硅HJT虽然AM0效率约20-22%，但工艺体系成熟、稳定性与一致性更易保障，适合作为成本敏感场景的可行替代方案；而钙钛矿叠层电池AM0效率可达30%-45%，同时能质比更高、抗辐射与温度系数表现“较强”，并具备柔性/折叠潜力，更契合太空场景对高功率密度与轻量化的长期需求。单结钙钛矿电池AM0效率较低，目前仅为18%-20%，同样具有抗辐射和轻量化优势。
- HJT晶硅、钙钛矿及钙钛矿叠层电池被市场视为潜在的下一代技术路线，其中钙钛矿路线实现组件价格与发射成本双路径降本。一方面，HJT晶硅与钙钛矿电池在成本端具备明显优势，远低于刚性砷化镓和柔性砷化镓；另一方面，由于钙钛矿组件能质比高，其轻量化使发射成本大幅降低。

表4：不同技术路线性能对比

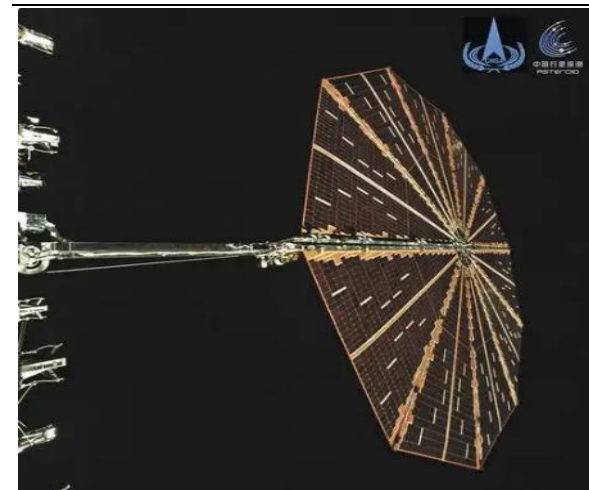
太阳能电池	AM0实测效率 (%)	组件能质比	能质比 (w/kg,实测)	抗辐射、高能粒子能力	温度系数	柔性、折叠性	制备成本
砷化镓电池	30%-40%	低	刚性 130 柔性 434	强	强	强	高
晶硅HJT电池	20%-22%	高	50μm 1350	较弱	较差	一般	低
钙钛矿及其叠层电池	单结钙钛矿 18-20% 叠层 30-45%	高	单结 1800 叠层 950	较强	较强	强	*中等 

资料来源：《Ultrathin (~30μm) flexible monolithic perovskite/silicon tandem solar cell》[J]. Science Bulletin, Law D C, et al. Lightweight, flexible, high-efficiency III-V multijunction cells[C]//2006 IEEE 4th world conference on photovoltaic energy conference. IEEE, 2006, 2: 1879-1882., NASA, Kaltenbrunner M, et al. Flexible high power-per-weight perovskite solar cells with chromium oxide-metal contacts for improved stability in air[J]. Nature materials, 2015, 14(10): 1032-1039., 国信证券经济研究所整理 *注：红色箭头表示具备提升潜力

各国在太空光伏的研发进展

- 在航天器用光伏方面，全球已进入太阳翼成熟体系工程化+新材料在轨验证并行的阶段。目前各国均以砷化镓多结电池为主流路线，中国天问二号和美国iROSA的柔性太阳翼已在空间站等平台实现工程化落地。在新材料的研发上，各国都开展了钙钛矿材料的在轨验证。
- 空间光伏电站方面，全球正由论证评估迈向关键链路验证。美国在轨演示领先并向对地传能推进，日本聚焦波束控制与低轨传能验证，欧洲以SOLARIS推进系统性评估与规划；中国则在全链路地面验证与示范体系建设上持续加速。

图5：我国天问二号探测器的伞形柔性太阳翼



资料来源：CNSA，国信证券经济研究所整理

表5：各国太阳翼及空间光伏电站的进展

国家	航天器用太阳翼发展现状	空间光伏电站技术情况
美国	航天电源体系以砷化镓系多结电池为主，并在空间站场景实现了柔性卷展太阳翼的工程化应用。部分机构已开展钙钛矿电池在轨材料暴露实验以评估空间极端环境下性能变化。	2020年完成PRAM在轨试验，验证“太阳能到微波”关键链路；2023年Caltech的SSPD-1入轨，完成多类光伏器件在轨表征（包含超轻柔性钙钛矿等）并开展在轨微波功率传输演示；军方体系下Arachne被规划为下一步关键任务窗口，面向空间到地面能量波束传输验证。
中国	空间站主电源已实现柔性大翼展太阳翼在轨运行，采用柔性三结砷化镓系电池，标志我国在空间站级别的柔性太阳翼工程化能力已成熟落地。上海港湾旗下的伏羲昕空公司自主设计、研发的钙钛矿卫星新材料电池及能控系统，已搭载多颗卫星在轨试验，目前一年持续正常进行。	以长期路线图牵引，把示范任务体系化前置。目前，重庆“天基太阳能电站实验基地”与西安“全链路地面演示验证系统”两大平台已启动建设。
欧洲	以砷化镓系为主流路线并形成标准化工程体系。2024年7月9日，由波茨坦大学、柏林工业大学等联合研发的全球首个钙钛矿串联太阳能电池，搭乘欧洲航天局的阿莉亚娜六号火箭成功进入太空，开启了极端环境下的性能实测。	已从前期评估进入系统性研发计划阶段。
日本	以刚性折叠展开式太阳翼为主流。理光公司的钙钛矿太阳能电池正在空间太阳能电池演示系统（SDX）上用于轨道演示，以探索电池在太空中的性能。	OHISAMA项目已启动，采用150kg级小卫星与2m×0.74m相控阵天线，在约450km轨道辐射1kW、5.8GHz射频，核心任务是验证远距离高精度指向与波束控制能力；同时规划推进低轨验证任务，覆盖轻量阵列展开、平面天线与天地微波传能测试。

资料来源：NASA，Georgia Tech，ESA，RICOH官网，Hou X. et al. 《A review on recent development of space solar power》[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(6): 33-51., 国信证券经济研究所整理



美国

在轨卫星11617颗。
以砷化镓系多结电池为主，并在空间站场景实现了柔性卷展太阳翼的工程化应用。部分机构已开展钙钛矿电池在轨材料暴露实验以评估空间极端环境下性能变化。



中国

在轨卫星1083颗。
在空间站级别的柔性太阳翼工程化能力已成熟落地，采用柔性三结砷化镓系电池。上海港旗下伏羲空自主设计、研发的钙钛矿卫星新材料电池及能控系统，已搭载多颗卫星在轨试验。



欧洲ESA成员国

在轨卫星1551颗。
以砷化镓系为主流路线并形成标准化工程体系。2024年7月9日，由波茨坦大学、柏林工业大学等联合研发的全球首个钙钛矿串联太阳能电池进入太空，开启了极端环境下的性能实测。



日本

在轨卫星203颗。
以刚性折叠展开式太阳翼为主流。理光公司的钙钛矿太阳能电池正在空间太阳能电池演示系统（SDX）上用于轨道演示，以探索电池在太空中的性能。



1968

美籍科学家Peter Edward Glaser提出SSPS概念。1970年代NASA和美国能源部（DOE）联合启动大规模可行性研究。1980年以后研究基本停滞。

● 1987

日本宇宙科学研究所开展初步，并将微波无线能量传输（WPT）作为重点研究方向



2007

美国政府通过SERT计划重启关键技术攻关。

● 2008

日本研究团队完成 1.8 kW 微波传能至500米外接收器的户外实验。



2014

中国相关部门联合开展了太空发电站发展规划及关键技术体系论证工作，立项“逐日工程”。



2018

中国在重庆璧山启动建设全国首个空间太阳能电站实验基地，聚焦微波传能与地面接收整流技术。



2022

欧洲航天局（ESA）正式提出“SOLARIS”计划，开展为期3-5年的技术预研与路线图制定。

● 2023

日本宇宙科学研究所与日本空间系统公司合作，在7000米高空飞机上测试微波束精准指向地面接收器，13个目标点全部命中，验证大气穿透与控制精度。



2023

中国完成300米高空微波无线传能试验，验证远距离高功率传输可行性。开发欧米伽设计方案：采用聚光+光伏+微波发射一体化结构，提升系统效率。

● 2024

日本宇宙科学研究所牵头“OHISAMA”的太空太阳能无线电力传输试验计划，原计划于2025年底前后发射小型卫星进行在轨验证。



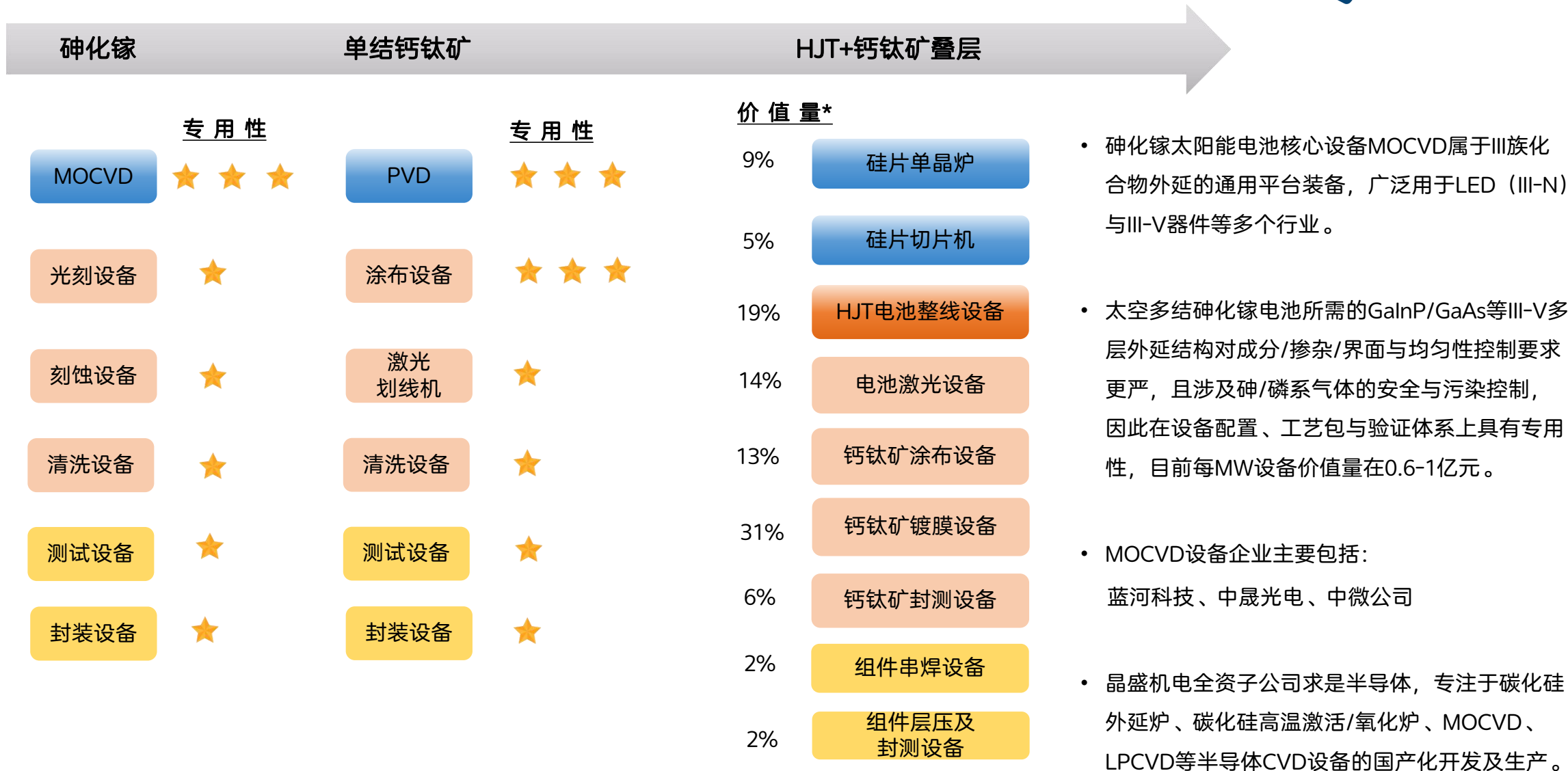
2025

中国“逐日工程”正式进入2.0版本，重心转向低轨在轨技术验证。启动平流层/浮空器平台试验，模拟近地轨道环境。

2040-2050

中国和日本研究团队均提出在2040-2050实现太空光伏电站的商业化应用的设想。

太空光伏设备梳理



资料来源：各公司官网，*注：叠层产线价值量数据取自地面光伏产品相关设备加总计算，由于太空光伏目前没有量产线推出，暂无市场参考价，预计将远高于比地面光伏设备。

太空光伏电池市场梳理（砷化镓）

多结砷化镓太阳能电池的核心构成是通过外延生长技术将多个具有不同禁带宽度的III-V族半导体材料堆叠而成，以实现太阳光谱的分段高效吸收。其主流结构为三结，部分前沿研究已拓展至四结甚至六结（4J/6J）。

• 锗基多结太阳能电池（当前主流）

目前国内研制的晶格匹配锗基三结太阳能电池效率均在30%以上。锗衬底不仅提供机械支撑，本身也作为光电转换层（底电池），形成磷化镓铟/砷化镓/锗三结结构，这是目前航天领域最成熟、量产占比超90%的构型。Fraunhofer ISE（德国）2023年报道的六结电池实现聚光条件达50%+的效率。

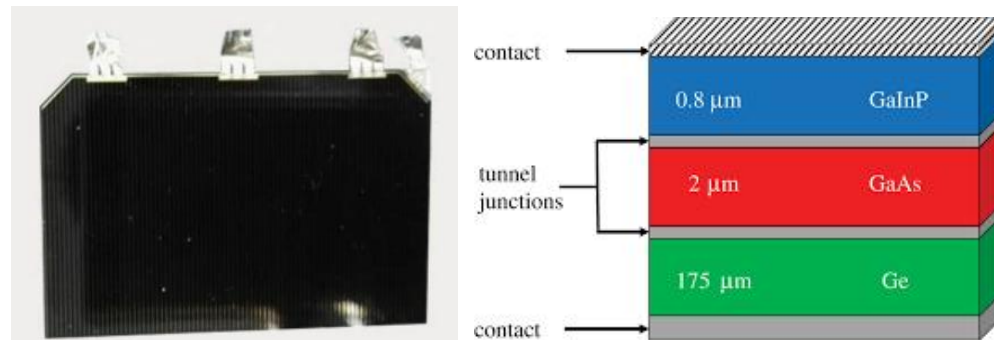
工艺流程为：在锗衬底上，先扩散出锗底电池，然后依次长隧穿结、渐变缓冲层、布拉格（DBR）反射器、砷化镓铟中间电池、隧穿结、磷化铝镓铟顶电池，最后生产用于制作电极的帽（Cap）层。

• 柔性薄膜砷化镓太阳能电池（创新方案）

薄膜化、柔性化路线聚焦提升能质比（W/kg）与收纳效率。在GaAs/Ge等衬底上完成多结外延与器件制备后，通过衬底减薄或外延剥离（ELO）去除厚衬底，将超薄器件层转移并键合至PI、金属箔等轻质基底，从而显著降低质量与体积约束，适配卷收/折叠太阳翼与大功率平台。

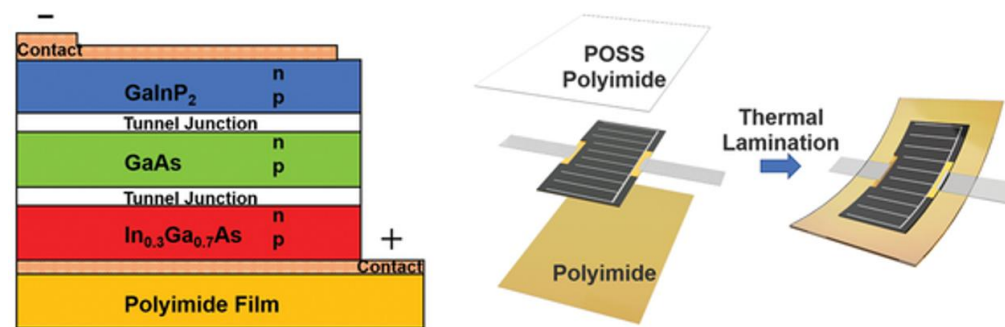
倒装失配多结太阳能电池（IMM）及更高结数（4J/5J）路线聚焦提升效率上限与单位面积功率（W/m²）。通过倒装生长顺序与渐变缓冲层等外延设计，突破晶格匹配体系对带隙组合的限制，优化电流匹配并提升效率潜力，更适用于太阳翼面积受限、单位面积输出优先的场景。IMM与薄膜化在流程上具备较强协同，均需要键合/去衬底步骤，可协同发展。

图6：锗基多结太阳能电池（当前主流）



资料来源：Koval N E, et al. Ab initio electronic stopping power for protons in Ga0.5In0.5P/GaAs/Ge triple-junction solar cells for space applications[J]. Royal society open science, 2020, 7(11)., HEMU官网, 国信证券经济研究所整理。

图7：柔性薄膜砷化镓太阳能电池（创新方案）

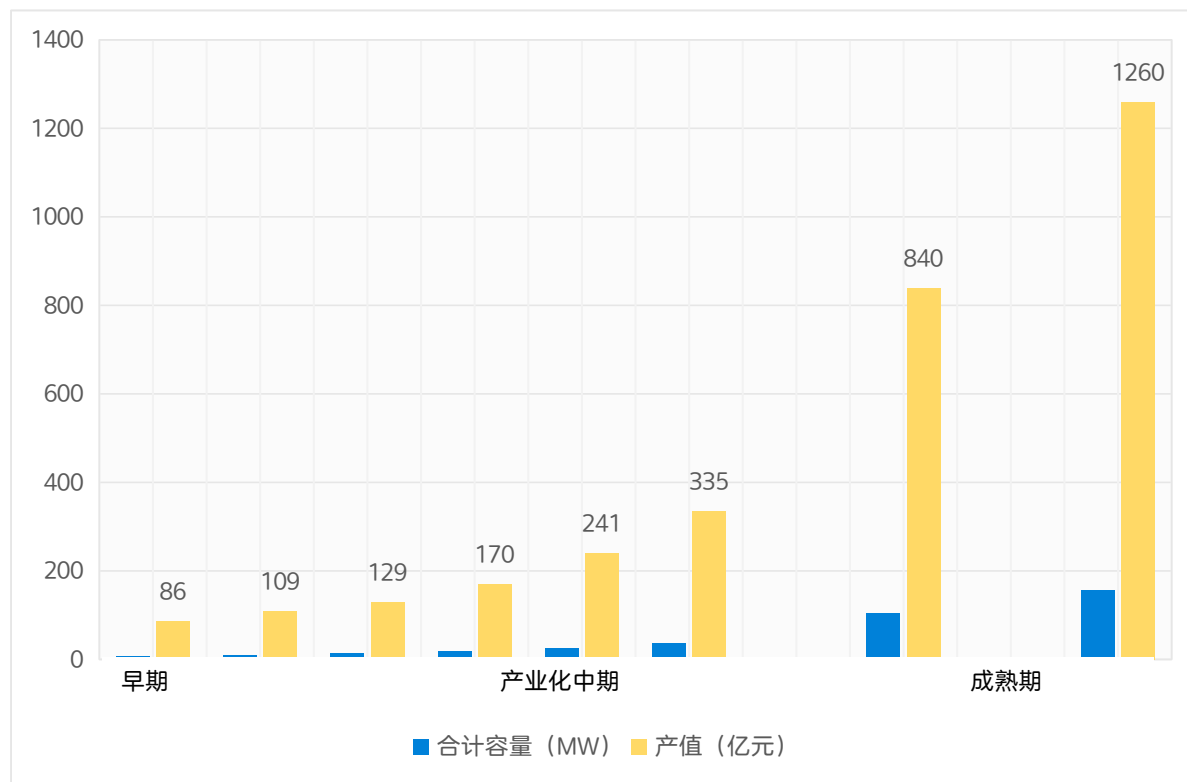


资料来源：Qian M, et al. POSS Polyimide Sealed Flexible Triple-Junction GaAs Thin-Film Solar Cells for Space Applications[J]. Advanced Materials Technologies, 2021, 6(12): 2100603.国信证券经济研究所整理。

太空光伏电池市场展望（砷化镓）

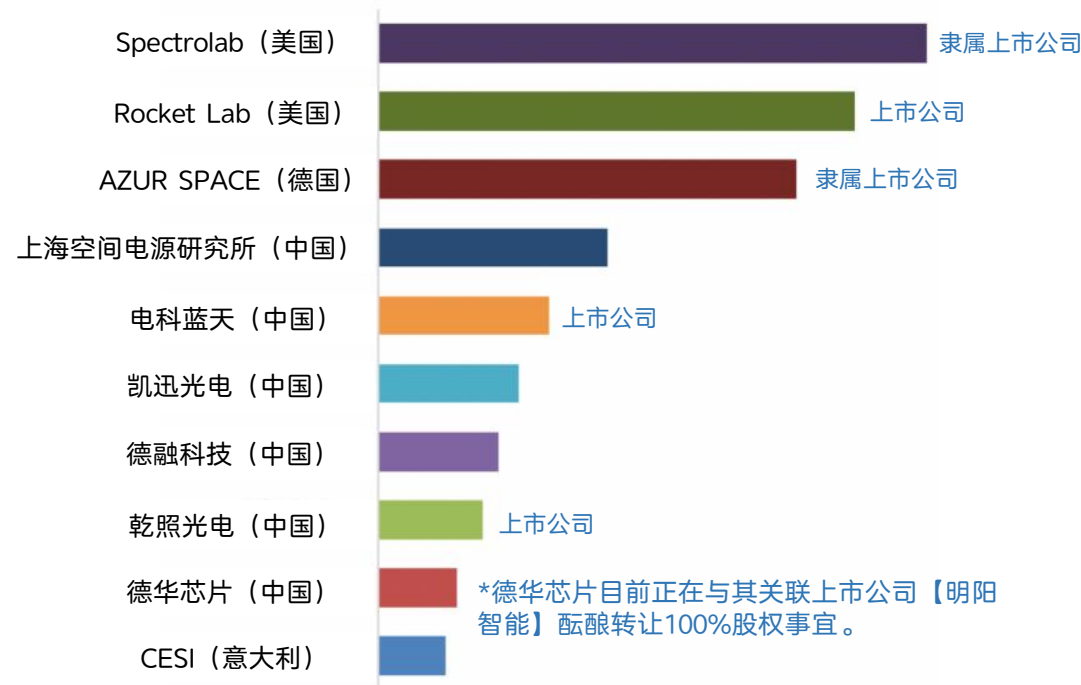
- 我们估算2025年发射入轨卫星对应的砷化镓电池产值超过80亿元，预计随着未来20年全球商业航天的高速发展以及太空算力和太空电站等新技术的创新，砷化镓市场规模将从约13MW增长到接近200MW，行业产值在未来逐步从100亿发展到产业中期的300亿元，以及成熟期行业接近千亿规模。
- 全球范围内砷化镓太阳能电池主要生产商包括Spectrolab, Rocket Lab, AZUR SPACE等，根据QYResearch（北京恒州博智国际信息咨询有限公司）的统计，2022年前三大厂商占有大约60%的市场份额。国内厂商中，上海空间电源研究所、电科蓝天、乾照光电、德华芯片营收规模位于行业前列。

图8：砷化镓太阳能市场规模预测（亿元）*



资料来源：2025卫星入轨数据来自泰伯智库，国信证券经济研究所整理并预测。*注：产值数据假设砷化镓太阳能电池为市场主体，同时考虑小比例其他新兴技术路线。

图9：2022年全球砷化镓太阳能电池业务收入排名

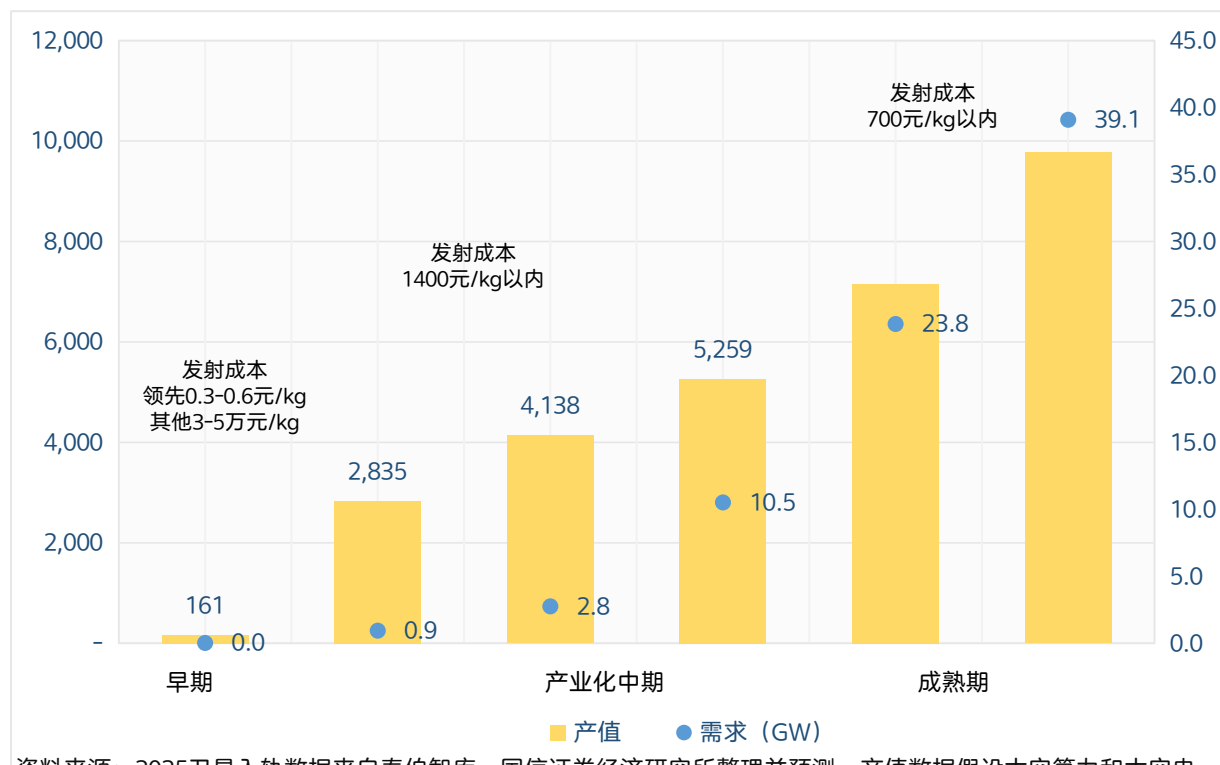


资料来源：QYResearch，国信证券经济研究所整理

太空光伏电池市场展望（晶硅+钙钛矿叠层）

- 由于目前没有相关技术路线的实证应用，产品均处于实验室阶段，因此我们主要结合替代地面AIDC的电费成本和光伏电站的经济性比较进行价格预测。我们预测HJT和钙钛矿基于太空算力和太空电站的容量需求，在产业中期可能从1GW增长到最乐观情景的每年39GW，市场产值从产业早期的161亿元可发展到成熟期的5000亿元以上。
- 由于国内外低成本运载能力的缺乏，发射成本在未来3-5年无法达到大规模应用太空光伏的阶段，因此电池企业无法通过技术优势在当下建立规模护城河。对于未来的电池市场格局，我们倾向于预期多数参与者可能来自航天体系和电池设备制造商体系；而非延续地面光伏电池行业的传统格局。同时核心辅材的生产制造和关键工艺可能被太空光伏电池企业一体化发展。

图10：钙钛矿叠层与纯HJT太空光伏市场规模预测（亿元）

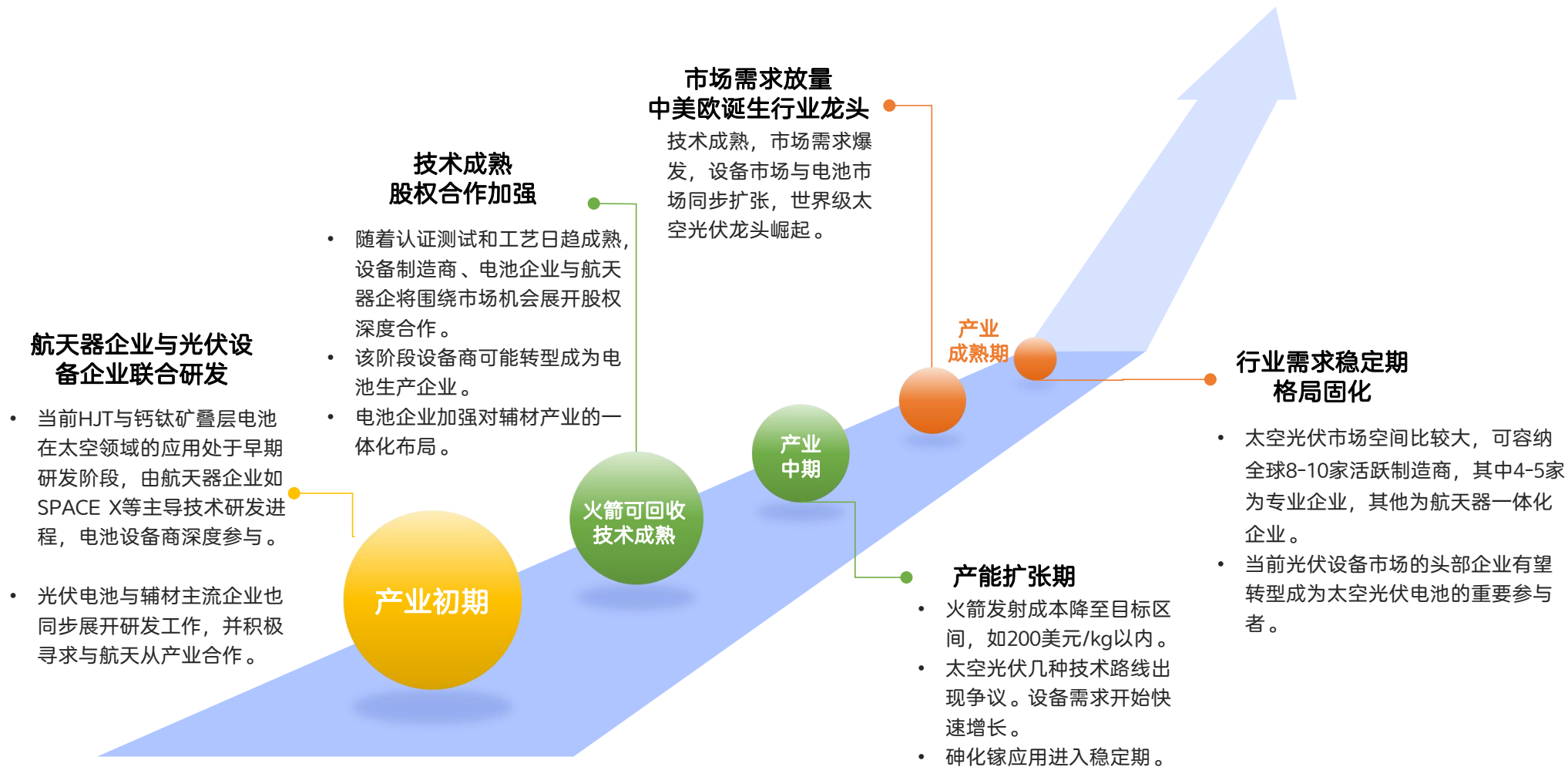


资料来源：2025卫星入轨数据来自泰伯智库，国信证券经济研究所整理并预测。产值数据假设太空算力和太空电站以钙钛矿+HJT叠层技术为主体，极小比例为晶硅HJT电池。

图11：钙钛矿叠层与晶硅HJT太空光伏市场格局预测



资料来源：业务布局信息来自钧达股份、天合光能，国信证券经济研究所整理与预测。



海外主要砷化镓电池厂商

表6: 海外主要砷化镓电池厂商概况

分类	公司名称	所属国家	布局情况
砷化镓电池	Spectrolab	美国	波音公司的全资子公司，全球航天器动力系统多结太阳能电池的主要商业供应商。目前每年能够生产近500千瓦（对应超过30颗高功率卫星）的多结太阳能电池和组件，其标志性产品如XTJ Prime电池效率达30.7%，已应用在国际空间站和火星探测车；公司累计发射规模超过300千瓦。1969年该公司为阿波罗11号任务提供的太阳能电池成为首个登陆月球的太阳能电池板。
砷化镓电池	Rocket Lab	美国	公司是一家整体解决方案商业航天公司，既做发射服务，也做卫星/航天器与核心部组件（Space Systems），并在向更大运力的可复用火箭迈进。2022年1月，公司以8000万美元现金收购SolAero Holdings，增强了Rocket Lab在太空太阳能电池领域的规模化制造能力。2025年4月，Rocket Lab推出了其下一代太阳能电池阵列产品线STARRAY，能够满足从约100瓦到超过2千瓦的广泛卫星功率需求；该产品采用了Rocket Lab自研的、效率最高的抗辐射四结太阳能电池，确保了在严酷太空环境下的高性能和长寿命。公司目前太空太阳能电池累计制造规模超过4MW。由RocketLab太阳能产品供电的在轨卫星超过1100颗。
砷化镓电池	Azur Space	德国	欧洲领先航天太阳能电池制造商，其核心产品是基于砷化镓（GaAs）材料的多结电池。AZUR SPACE的产品深度参与了欧洲众多里程碑式的航天项目，是欧洲空间局（ESA）及全球主要航空航天企业的重要供应商。Azur寿命起始效率（BOL）约为35%，应用在欧洲航天局的木星冰月探测器Juice任务、美国宇航局未来前往木星卫星Europa的Europa Clipper任务等。
砷化镓电池	Sharp Corporation	日本	公司是全球太空光伏领域重要参与者，拥有超过五十年的航天产品研发经验。公司核心优势在于其高效、轻量且可靠的多结太阳能电池技术，提供一系列符合航天标准的产品，以满足从近地轨道到深空探测的不同任务需求。1976年，日本第一颗实用型空间卫星“Ume”号成功发射，其搭载的正是夏普的单晶硅太阳能电池。2025年，公司宣布未来3年投入1800亿日元用于设备投资与并购，明确将重点投资钙钛矿太阳能电池与太空太阳能模块领域。
砷化镓电池	CESI	意大利	公司已经为来自25个国家的100多颗卫星生产超过20万颗太阳能电池，是全球领先的民用航天应用太阳能电池制造商之一，并且是唯一一家完全由欧洲拥有所有权的同类制造商。2025年3月，公司在其米兰实验室开设了一条用于太空任务太阳能电池的新生产线并成立CESI航天事业部。公司的标准三结太空光伏电池技术先进，典型效率为30%，已获认证适用于低空轨道（LEO）和地球静止轨道（GEO）卫星。

资料来源：公司公告，公司官网，国信证券经济研究所整理

国内主要砷化镓电池厂商

表7：国内主要砷化镓组件供应商概况

分类	公司代码	公司简称	布局情况
砷化镓电池	300102.SZ	乾照光电	公司是国内领先的砷化镓电池外延片企业，出货量稳居国内市场第一。公司量产的三结砷化镓电池转换效率处于国际领先行列，有在轨经验近20年，已批量应用于国内在轨运行的大型商业航天星座组网卫星（如G60千帆星座等）。公司海外市场拓展也持续推进，与海外头部卫星公司达成合作。
砷化镓太阳电池阵（集成） 单结钙钛矿电池	605598.SH	上海港湾	旗下伏羲昕空专业从事卫星能源系统及其单机产品的研究、设计及生产制造，以及航天器柔性卷轴机构、太阳翼压紧释放装置等执行机构。公司表示其钙钛矿太阳电池产品单结钙钛矿电池效率已达到27%，已经于2024年底发射并在轨运行。已有40余套卫星电源系统及太阳结构机构在轨运行正常，产品飞行经历丰富，7项宇航级太阳电池相关核心专利获得受理或授权。自2023年8月起，伏羲昕空投产运行一条空间级太阳电池生产线及一条柔性太阳阵总装线。
砷化镓电池	德华芯片	*明阳智能 601615.SH	明阳智能是国内风电整机龙头，计划通过发行股份及支付现金的方式收购德华芯片的100%股权。德华芯片是国内太空光伏电池领域的核心企业之一，是国家级专精特新“小巨人”企业，其研制的GaInP/GaAs/GaInAs三结电池经德国Fraunhofer太阳能系统研究所测试认证，转换效率达到36.6%，量产外延片、芯片效率已经提升至32%。公司具备从材料、外延片、芯片到空间能源系统的全产业链研制能力，公司研发的产品已成功搭载于天舟6号货运飞船，并应用于巴基斯坦科学实验星等国外卫星。2025年第四季度，德华芯片在中山火炬高新区的30亩总部基地项目动工，将建设4条砷化镓太阳电池生产线，打造全产业链生产基地，预计2026年建成后产能提升40%。
砷化镓电池衬底	002428.SZ	云南锗业	公司是国内锗产业链的龙头企业，核心产品太阳能电池用锗单晶片主要作为生产太空太阳能电池的衬底材料，下游客户主要是外延片生产厂商，通过中游电源/电池供应商间接供应卫星制造产业链。公司于2025年3月启动“空间太阳能电池用锗晶片建设项目”，项目完全建成后将达到年产250万片锗晶片的总产能目标。受国内通信卫星组网快速推进影响，下游需求快速增加使得2025年上半年光伏级锗产品营收同比增长212%。
太阳翼系统集成商 砷化镓电池外延片	688818.SH	电科蓝天	公司是中国宇航电源领域的龙头，提供从核心材料到完整系统的全套解决方案，产品主要包括空间太阳电池阵、空间锂离子电池组和电源控制设备及其构成的电源系统，应用于航天器和临近空间飞行器，宇航电源产品在国内市场覆盖率超过50%。近年来公司已为神舟系列飞船、天舟系列飞船、空间站“天和”核心舱、“问天”/“梦天”实验舱、北斗导航、嫦娥系列探月卫星、探火工程、千帆星座、国网星座等多个国家级重点型号工程提供电源产品。

资料来源：公司公告，公司官网，国信证券经济研究所整理

当前主要晶硅与钙钛矿设备企业

表8：当前主要晶硅与钙钛矿设备企业

分类	市场格局	CR2 CR4	行业 毛利率 (%)	当前参与者
晶硅硅片环节				
硅片 单晶炉	主流2-3家 活跃3-5家	85% 100%	~20%	晶盛机电 (市占率约65%) 连城数控 (市占率约20%)
超薄 切片机	主流2-3家 活跃3-5家	75% 100%	~25%	高测股份 (市占率约50%) 宇晶股份、晶盛机电、连城数控
晶硅电池环节				
HJT 整线设备	主流2-3家 活跃3-5家	90% 100%	~30%	迈为股份 (市占率70%-75%) 捷佳伟创 (15%-20%) 拉普拉斯 (3%-5%)
电池 激光设备	主流2-3家 活跃3-5家	比较分散	~25%	帝尔激光、海目星、捷佳伟创、 迈为股份、联赢激光、大族激光

分类	市场格局	CR2 CR4	行业 毛利率 (%)	当前参与者
钙钛矿电池环节				
激光设备	主流3-4家 活跃5-7家	比较分散	~35%	帝尔激光、大族激光、 杰普特、德龙激光
镀膜设备	主流2-3家 活跃3-5家	50% 70%	~25%	捷佳伟创、微导纳米、迈为股份 京山轻机、先导智能、奥莱德、众能 光电
涂布设备	主流1-2家 活跃3-5家	85% 95%	~25%	德沪涂膜 (市占率约70%) 曼恩斯特、捷佳伟创、众能光电
封测设备	主流2-3家 活跃3-5家	比较分散	~20%	京山轻机、捷佳伟创 弗斯迈、众能光电
组件封装环节				
串焊设备	主流2-3家 活跃3-5家	85% 100%	~25%	奥特维 (市占率约60%) 宁夏小牛、光远股份、迈为股份
层压及封测 设备	主流2-3家 活跃3-5家	70% 90%	~20%	京山轻机 (晟成光伏, 市占率超50%) 金辰股份

资料来源：公司公告和财务数据，国信证券经济研究所整理与估计。注：行业市占率和毛利率为历史某个节点的暂态数据汇总，实际情况以未来行业实际情况和企业披露信息为准，请谨慎参考使用。

布局太空光伏设备供应商



表9：我国太空光伏设备供应商

分类	公司代码	公司简称	布局情况
HJT/钙钛矿叠层设备	300724.SZ	捷佳伟创	突破钙钛矿叠层电池关键设备RPD（反应等离子体沉积），全面布局TOPCon、HJT、钙钛矿等高效电池产线设备
HJT/钙钛矿叠层设备	300751.SZ	迈为股份	提供HJT及钙钛矿叠层电池整线设备，完成多项技术验证，支持客户推进太空光伏技术升级；公司已与国内新能源企业签订钙钛矿/硅异质结叠层电池整线供应合同，拿下在叠层电池领域的首个商业化整线订单。
激光设备	300776.SZ	帝尔激光	提供钙钛矿薄膜太阳能激光综合加工设备，覆盖激光刻蚀、切割等核心工艺环节
钙钛矿模切设备	688025.SH	杰普特	提供钙钛矿模切设备，激光与光学智能装备可用于电池精密加工
薄片化晶硅硅片设备	300316.SZ	晶盛机电	光伏硅片设备龙头，公司单晶炉、切片机等设备可支撑高效硅基太空光伏电池的上游材料制备。其设备适配超薄硅片（如70-80 μ m厚度）的生产需求，满足太空光伏对轻量化、高效率电池片的要求，且自动传输系统能保证超薄硅片良率，有望受益于太空光伏对硅片产能的扩张需求。
组件串焊设备/钙钛矿叠层设备	688516.SH	奥特维	全球光伏串焊机龙头（市占率超70%），正在研发适配超薄HJT、钙钛矿组件的高精度串焊机，相关样机已送测。该设备可满足太空光伏组件对轻量化、高精度焊接的需求，是太空光伏组件量产的关键设备之一。
钙钛矿涂布设备	301325.SZ	曼恩斯特	钙钛矿涂布设备细分龙头，专注于高精密切缝式涂布技术，其涂布设备连续速度达60m/min，处于行业领先水平。公司通过自研的定制化涂布模头、高精密切射泵、智能控制等关键技术，形成了稳定可靠的“配方-工艺-设备”协同研究开发能力，完成了大面积溶液薄膜均匀涂布及结晶一体化布局。

资料来源：公司公告，公司官网，国信证券经济研究所整理

布局太空光伏辅材供应商

表10: 我国太空光伏辅材供应商

分类	公司代码	公司简称	布局情况
组件背板封装	300393.SZ	中来股份	正进行背板产品适配太空光伏组件的封装开发与实验，钙钛矿晶硅叠层产品处于研发阶段
太空组件胶膜封装	603806.SH	福斯特	探索太空光伏封装材料的新技术要求，响应极端环境下的材料性能升级需求
HJT光转膜	603212.SH	赛伍技术	光伏封装胶膜与背板全球龙头，光转膜产品可延伸至太空光伏HJT组件封装场景。
柔性太阳翼封装CPI膜	688323.SH	瑞华泰	航天级CPI薄膜独供企业，用于柔性太阳翼封装，保障太空光伏组件稳定性。
太阳翼碳纤维	300699.SZ	光威复材	碳纤维复合材料供应商，为卫星轻量化太阳翼结构提供材料支持。
组件粗型焊带封装	301266.SZ	宇邦新材	焊带产品覆盖HJT、XBC等先进电池技术路线，包括多层复合焊带、超细焊带等。这些产品可提升光伏组件串联效率，满足太空光伏对高效率、轻量化、抗辐射的需求。例如，其多层复合焊带能提高组件效率3%-5%，适用于太空环境下的高效电池技术。
HJT银包铜银浆	300842.SZ	帝科股份	公司通过收购浙江索特，强化了在全球光伏导电浆料市场的地位，同时借助其技术与客户资源，加速太空光伏领域的布局。此外，帝科股份将太空光伏视为战略方向之一，与存储芯片、高铜浆料等业务形成协同，推动电子材料在高端领域的应用。
HJT银包铜银浆	688503.SH	聚和材料	公司与东方日升等企业保持长期合作，为其提供HJT电池用低温银浆等关键材料。随着东方日升的超薄HJT电池技术在太空光伏领域的应用拓展，聚和材料的浆料产品也同步参与其中，助力提升电池在太空环境下的性能和可靠性。

资料来源：公司公告，公司官网，国信证券经济研究所整理

钧达股份商业航天布局全景：全面切入太空能源+卫星平台



- 公司管理层长期深耕电池技术的研发与产业化，布局钙钛矿电池技术多年，早年即启动钙钛矿电池相关研究工作，聚焦钙钛矿与晶硅叠层技术路线，目前公司已建成小型叠层电池产线，其地面光伏产品转化效率可达33%以上。
- 通过H股配售增资用于推动太空光伏业务发展及商业航天领域股权投资。公司于2026年2月2日在港股上市，募集资金约3.98亿港元，其中约45%（1.79亿港元）用于太空光伏电池相关产品的研发与生产，约45%（1.79亿港元）用于商业航天领域的股权投资与合作，约10%用于补充营运资金。
- 在资本运作层面，钧达股份通过股权投资+成立合资公司的途径实现对商业航天产业链的多点切入。（1）参股上海星翼芯能，卡位太空光伏电池及钙钛矿路线；（2）与上海星翼芯能共同出资设立均达航天，作为推进太空能源产品组件/产品化制造与产业化落地的载体；（3）通过控股上海复遥星河并间接控股其全资子公司巡天千河，切入整星研发与制造环节，形成商业航天领域多路径协同推进的布局框架。

表11：钧达股份布局商业航天方式

时间	布局方式	具体情况
2026年1月13日	股权投资上海星翼芯能，围绕空间钙钛矿电池	出资 3000万元认购上海星翼芯能16.67% 股权。该公司由尚翼光电团队新设，用于承接尚翼光电的全部资产、人员及业务，并且后续尚翼光电将调整为上海星翼芯能的全资子公司。双方将围绕面向太空算力与空间能源应用的柔性钙钛矿技术研发与产业化展开合作。
2026年1月23日	成立合资公司，控股钧达航天，推进太空能源产品制造	钧达股份控股子公司捷泰科技（70%）与星翼芯能（30%）共同出资成立上饶钧达航天空间科技有限公司，作为推进太空能源产品制造的核心实体。
2026年2月2日	募资，配售H股，用于太空光伏与商业航天	完成H股配售，配售所得款项净额约为3.98亿港元。其中，约45%（1.79亿元）用于太空光伏电池相关产品的研发与生产，约45%（1.79亿元）用于商业航天领域的股权投资与合作。
2026年2月4日	股权投资，控股卫星总体公司	通过投资成为上海复遥星河航天科技有限公司60%的控股股东，其全资子公司巡天千河为卫星整星与核心组件制造企业。此举实现了公司从电池组件向卫星整星研发与总装的跨越式升级。

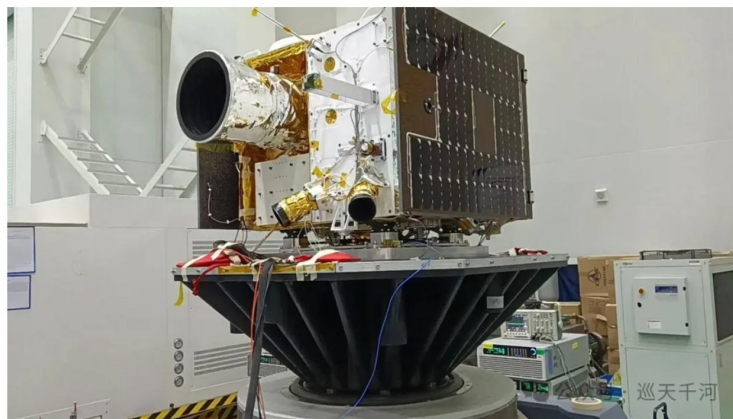
资料来源：公司公告，Wind，国信证券经济研究所整理

钧达股份商业航天布局全景：多路径切入“太空能源 + 卫星平台”



- **股权投资空间钙钛矿技术企业上海星翼芯能。**1月14日，公司发布公告称，拟以现金出资人民币3,000万元，获得上海星翼芯能16.6667%的股权。上海星翼芯能由**尚翼光电**团队新设，用于承接尚翼光电的全部资产、人员及业务，并且后续尚翼光电将调整为上海星翼芯能的全资子公司。双方将深度整合产业与场景资源，围绕钙钛矿电池技术在太空能源的应用展开合作，在技术研发、在轨验证、产业化落地及应用场景拓展等方面建立协同机制。**尚翼光电拥有中科院上海光机所技术背景，是国内稀缺的卫星电池生产商。**核心团队深耕钙钛矿航天应用多年，聚焦柔性钙钛矿光伏技术在太空场景的应用研发，在太空极端环境（高低温、强辐射、真空）适配性配方、抗辐照结构设计等方面具备独家技术优势，依托中科院深厚的技术背景，建有独有的太空仿真研发平台，**目前已完成太空环境下钙钛矿材料第一性原理验证。**
- **与上海星翼芯能合资成立上饶钧达航天。**2月2日，钧达股份控股子公司捷泰科技与星翼芯能共同出资成立上饶钧达航天空间科技有限公司，作为推进太空能源产品制造的核心实体，其中均达股份直接控股70%。
- **控股卫星整星研发与制造企业巡天千河。**2月4日，通过投资成为上海复遥星河航天科技有限公司60%的控股股东，其全资子公司巡天千河为卫星整星与核心组件制造企业。此举实现了公司从电池组件向卫星整星研发与总装的跨越式升级。巡天千河具备一吨以下卫星的整体设计研制、总装和测试能力，覆盖卫星物联网、卫星互联网、激光通信、高分辨率遥感、SAR、空间科学、新技术验证、太空算力等多种类型卫星研制能力。截至2026年2月，巡天千河在24年8月成立以来已发射7颗卫星，在研卫星二十余颗，获得海外多颗订单，卫星年产能超过100颗。

图12：巡天千河开运一号卫星



资料来源：公司官网，国信证券经济研究所整理。

表12：巡天千河部分已发射卫星情况

卫星	运行情况
激光通信AI智算双星	实现在低轨道数千公里长时稳定建链，将在轨AI+高速光通信赋能卫星遥感。
高光谱遥感卫星	采用基于计算光谱感知新型面阵探测技术，整星重量40公斤，高光谱分辨率达5米。
亚米级高分辨率应急遥感卫星	可获取0.7米分辨率全色图像、2.8米分辨率多光谱图像及目标区域视频数据，主要完成应急救援、智慧农业、环境监测等遥感应用任务。
商业微纳气象卫星	卫星配置了GNSS掩星探测仪载荷，通过双极化及单极化组合天线，支持多系统、多参量GNSS掩星观测。

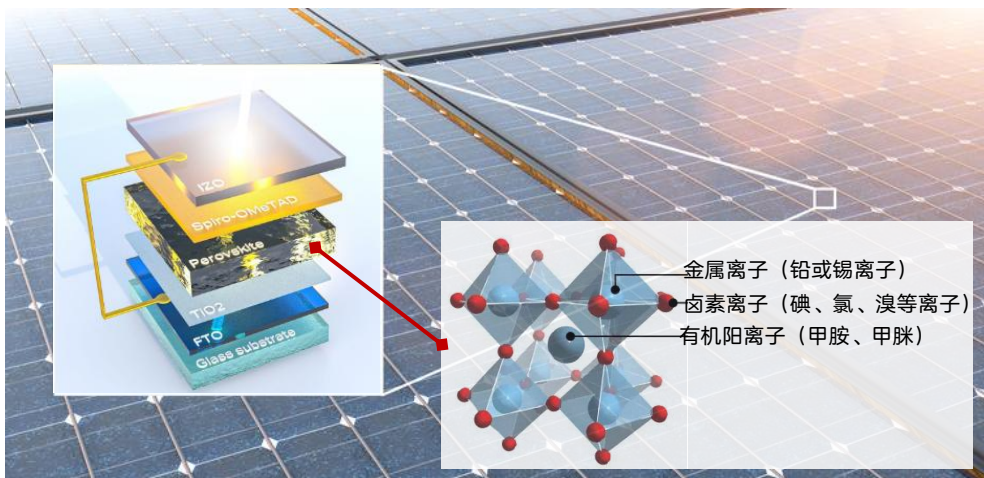
资料来源：公司官网，国信证券经济研究所整理

三、钙钛矿技术深度介绍

钙钛矿电池以钙钛矿材料为核心吸光层

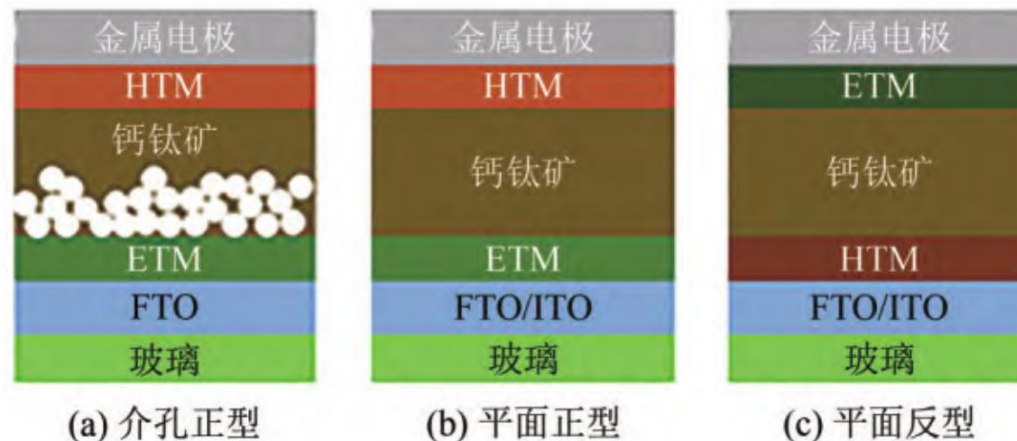
- 不同于BSF、PERC、TOPCon、BC、HJT电池以晶硅为吸光材料，钙钛矿太阳能电池以钙钛矿材料为核心吸光层。钙钛矿电池是一种利用钙钛矿型晶体结构的有机-无机杂化金属卤化物半导体作为吸光层的新型太阳能电池，2009年由日本学者首次实现，效率为3.8%，2025年实验室效率达26.1%，逼近晶硅电池。BSF、PERC、TOPCon、BC、HJT电池则均属于晶硅电池。钙钛矿材料呈 ABX_3 结构，包括金属离子、卤素离子及有机阳离子。
- 钙钛矿电池的结构分为透明导电层（ITO/FTO玻璃，负责透光与电子收集）、电子传输层（ C_{60}/SnO_2 ，用于定向传输电子）、钙钛矿吸光层（如 $MAPbI_3$ ，是光能→电能转换核心）、空穴传输层（Spiro-OMeTAD/ NiO ，用于定向传输空穴）及金属电极（Au/Ag，用于电荷输出）。
- 单结钙钛矿电池构型上以平面反型结构为主流。钙钛矿电池结构可以分为介孔正型、平面正型及平面反型。介孔结构类似于染料敏化太阳能电池，具有较高的稳定性和填充因子，主要用于早期的钙钛矿电池研究；而平面结构便于大面积制备，尤其适用于工业生产，因此逐渐成为研究主流。根据传输层材料的不同，钙钛矿电池的结构还可以分为正型结构和反型结构，其中反型结构以其更高效率、更高稳定性、低滞后效应以及叠层工艺的高度兼容性，成为目前的主流路线。

图13: 钙钛矿电池示意图及材料结构



资料来源：澳大利亚联邦科学与工业研究组织、国信证券经济研究所整理

图14: 钙钛矿电池结构

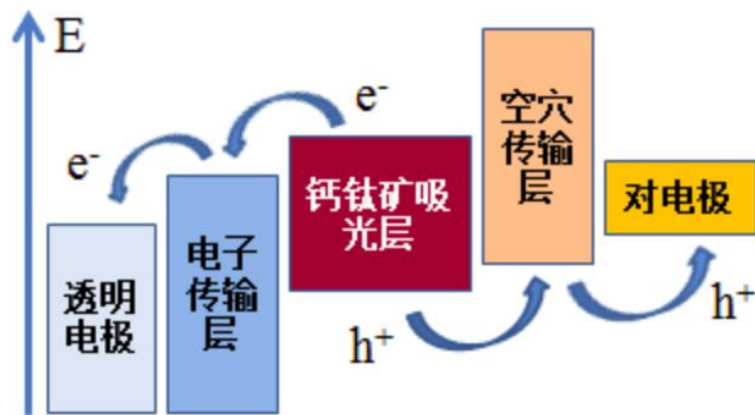


资料来源：李白茹,等.钙钛矿太阳能电池研究进展[J].化工进展,2025,44(05):2598-2624, 国信证券经济研究所整理

钙钛矿电池优势：效率突破晶硅天花板

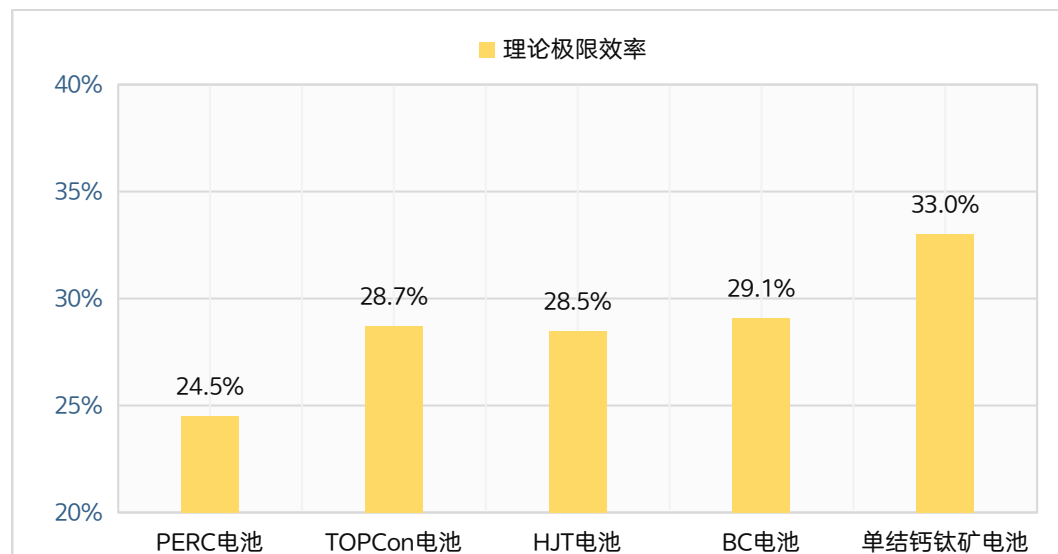
- 钙钛矿电池的发电机理基于光生伏特效应。当太阳光照射钙钛矿吸光层时，能量大于带隙的光子将价带电子激发至导带，形成受库仑力束缚的电子-空穴对（激子）；随后在内建电场作用下，激子在钙钛矿层与传输层界面解离为自由电子和空穴，电子通过电子传输层（ETL）向阴极迁移，空穴通过空穴传输层（HTL）向阳极迁移；最终两侧电极分别收集电荷形成电流输出。
- 钙钛矿电池的高光电转换效率依赖于钙钛矿材料的高吸光系数、低激子结合能及载流子迁移率，并通过能级匹配的传输层实现高效电荷分离与运输。
- 核心优势：钙钛矿电池理论效率极限高于晶硅电池。钙钛矿电池的核心优势在于其单结理论极限效率可达33%，显著高于晶硅电池的29.4%，这种效率优势源于钙钛矿材料优异的吸光性能和可调控的带隙特性。钙钛矿电池的实际研发进展迅猛，单结钙钛矿电池的实验室最高认证效率已达27.32%（海南大学，2025年），接近晶硅电池的27.8%（隆基BC）。

图15：钙钛矿电池发电原理



资料来源：杨林 等.钙钛矿太阳能电池的研究进展[J].化工技术与开发, 2015(9):6, 国信证券经济研究所整理

图16：不同光伏技术理论极限效率

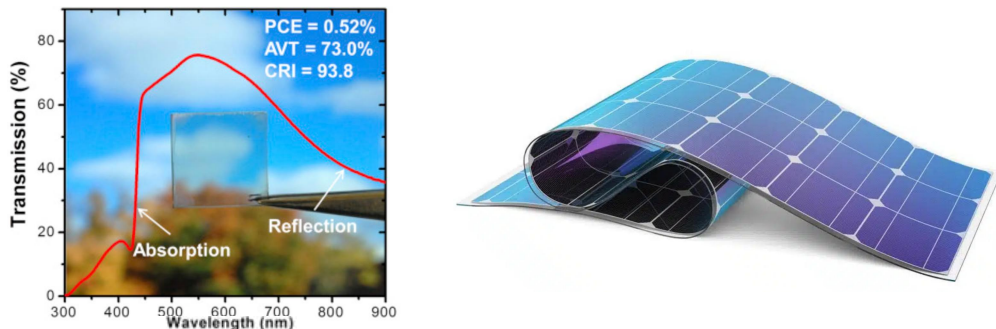


资料来源：中国证券报、Jianghui et al. Monolithic Perovskite-Perovskite-Silicon Triple-Junction Tandem Solar Cell with an Efficiency of over 20%. ACS. Energy. Lett. 2022, 7, 3003-3005, 国信证券经济研究所整理

钙钛矿电池优势：透光性、柔性、弱光效应及低温度系数

- **优势二：透光性。**通过调控钙钛矿层厚度及卤素比例，电池透光率可在10%-90%范围内精确设计。半透明组件允许部分可见光透过，同时吸收紫外/红外光发电，适用于建筑幕墙、温室顶棚，实现发电与采光平衡。
- **优势三：柔性。**钙钛矿电池可制备于PET/PEN等柔性基底上，厚度不足1微米，重量仅2kg/m²，弯折半径可小至1厘米，适配车顶曲面、可穿戴设备等非平面场景，突破晶硅刚性限制。
- **优势四：弱光效应。**钙钛矿吸光系数高达10⁵cm⁻¹，而晶硅仅10³cm⁻¹，即钙钛矿电池在阴天及室内等弱光条件下转换效率更高。仁烁光能实证显示，单瓦钙钛矿组件发电量高于TOPCon组件。
- **优势五：低温度系数。**钙钛矿电池温度系数仅-0.001%/°C（晶硅为-0.3%/°C），即当表面温度较高时钙钛矿组件发电功率更高，在沙漠/高温地区优势显著。仁烁光能实证显示，午间温度较高时钙钛矿组件发电功率高于TOPCon组件。

图17：钙钛矿组件的透光性与柔性特点

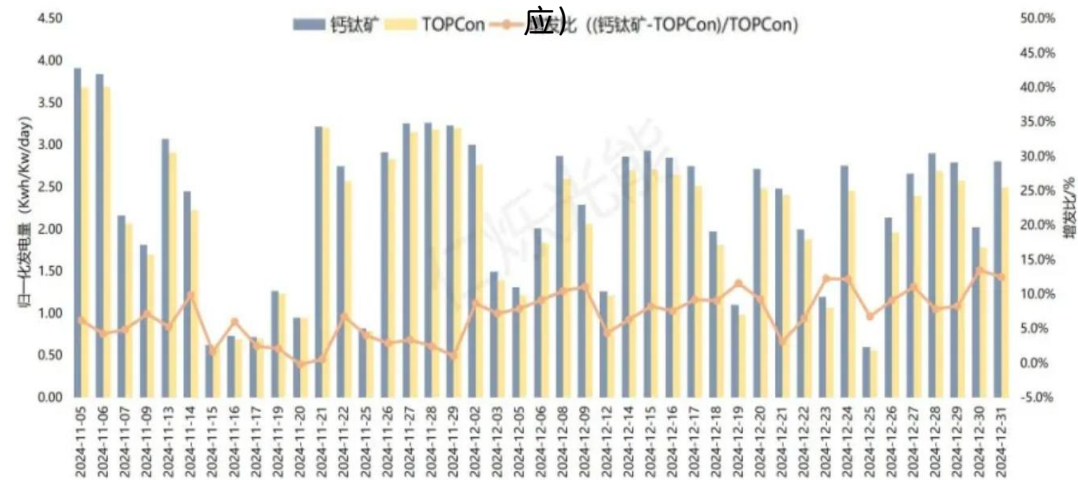


资料来源：Liu D, Yang C, Lunt R R. Halide perovskites for selective ultraviolet-harvesting

transparent photovoltaics[J]. Joule, 2018, 2(9): 1827-1837., PulseForgr, 国信证券经济研究所整理

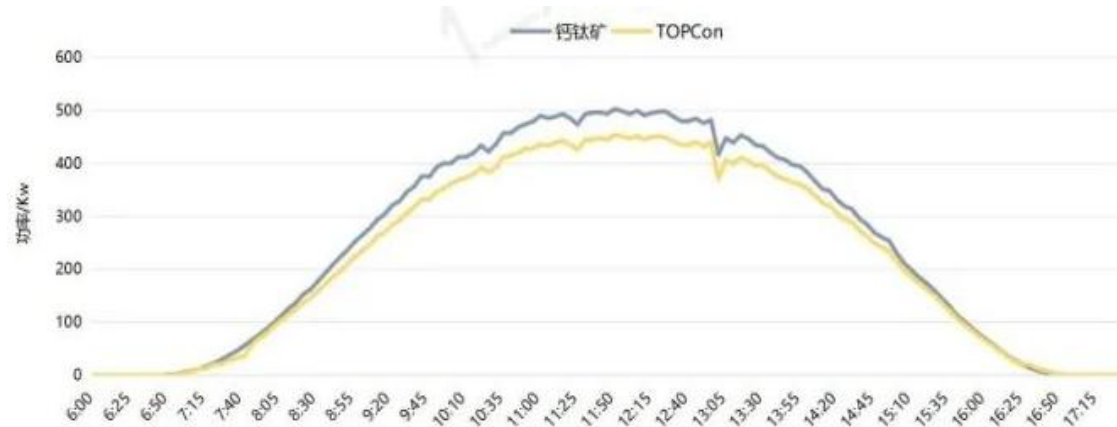
请务必阅读正文之后的免责声明及其项下所有内容

图18：仁烁光能钙钛矿组件 VS TOPCon组件单瓦发电量对比（弱光效



资料来源：仁烁光能，国信证券经济研究所整理

图19：仁烁光能钙钛矿组件 VS TOPCon组件单日每kW发电功率对比（低温度系数）

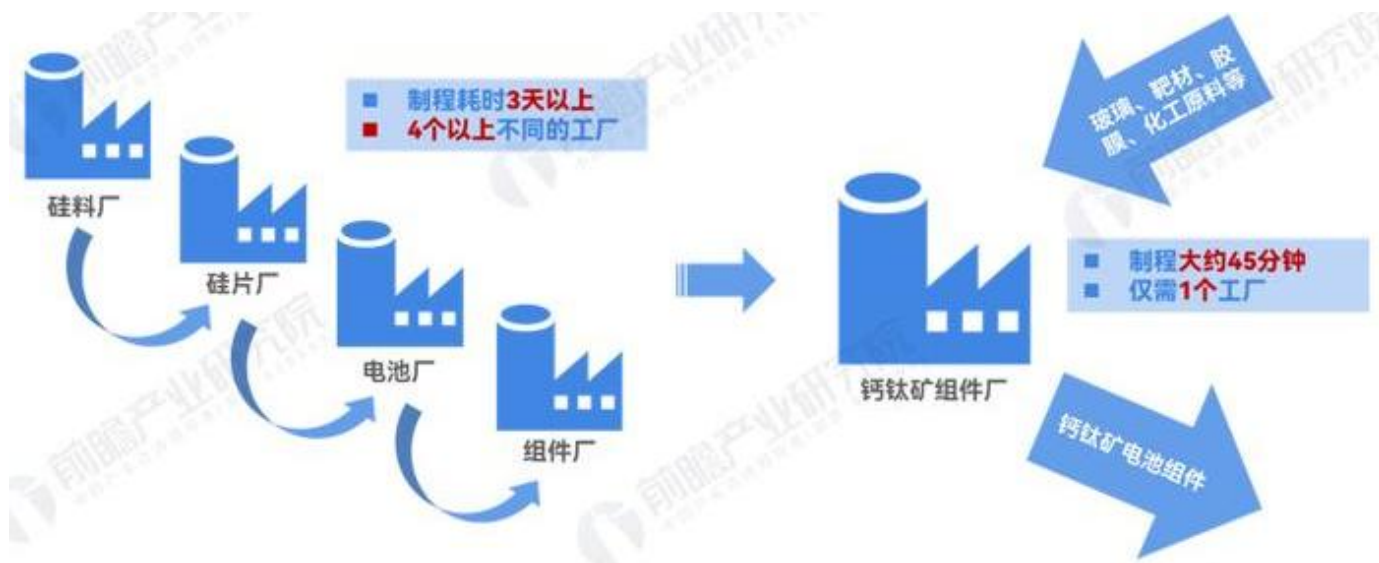


资料来源：仁烁光能，国信证券经济研究所整理

钙钛矿电池与晶硅电池CAPEX对比：环节减少，远期投资额更低

- 钙钛矿电池制造流程简单，而晶硅电池需经历硅料-硅片-电池-组件四个环节。与晶硅电池需在硅料、硅片、电池、组件四个独立工厂耗时3天以上完成全流程相比，钙钛矿电池在单一工厂内仅需45分钟即可完成从玻璃、胶膜、靶材到组件的全流程生产，大幅简化产业链环节。
- 钙钛矿电池目前单GW投资额与晶硅电池接近，远期将降低至晶硅电池的一半，约5亿元/GW。远期产线投资额方面，钙钛矿量产后单GW产能投资可降至5亿元，仅为晶硅全产业链投资硅料至组件约7-10亿元/GW的一半，叠加材料利用率高（>90%）、能耗低（0.12kWh/W vs 晶硅1.52kWh/W）等优势，远期降本潜力显著。

图20：钙钛矿电池与晶硅电池制造过程对比



资料来源：协鑫光电，前瞻产业研究院，国信证券经济研究所整理

表13：n型晶硅电池产线投资成本

环节	产线投资额 (亿元/GW)
硅料	2.5
硅片	1.5
TOPCon电池片	1.7
HJT电池片	3.0
BC电池片	3.8
组件	1
合计	约7-10

资料来源：亚太光伏，势银光链，平安银行，全球光伏，国信证券经济研究所整理与测算

表14：单结钙钛矿电池产线投资额

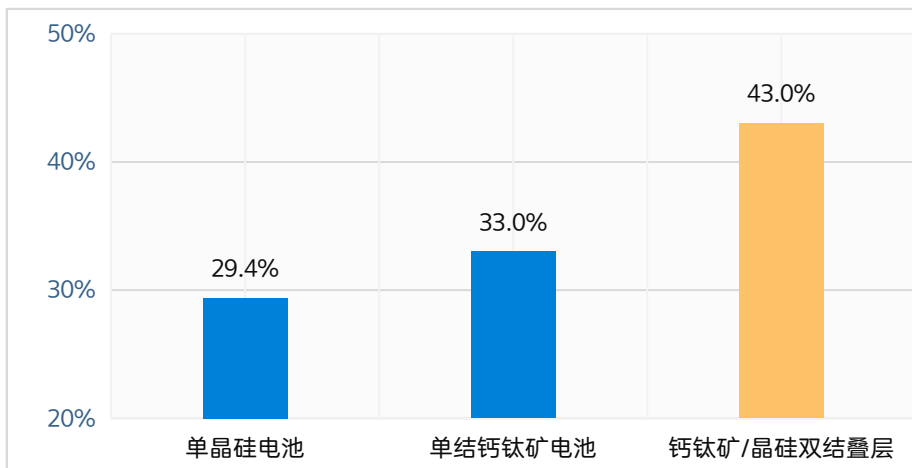
环节	产线投资额 (亿元/GW)	远期 (亿元/GW)
激光设备	2	1
镀膜	5	2.5
涂布	2	1
封测	1	0.5
合计	10	5

资料来源：高工产研，势银光链，平安银行，全球光伏，国信证券经济研究所整理与测算

钙钛矿/晶硅叠层电池理论极限达43%

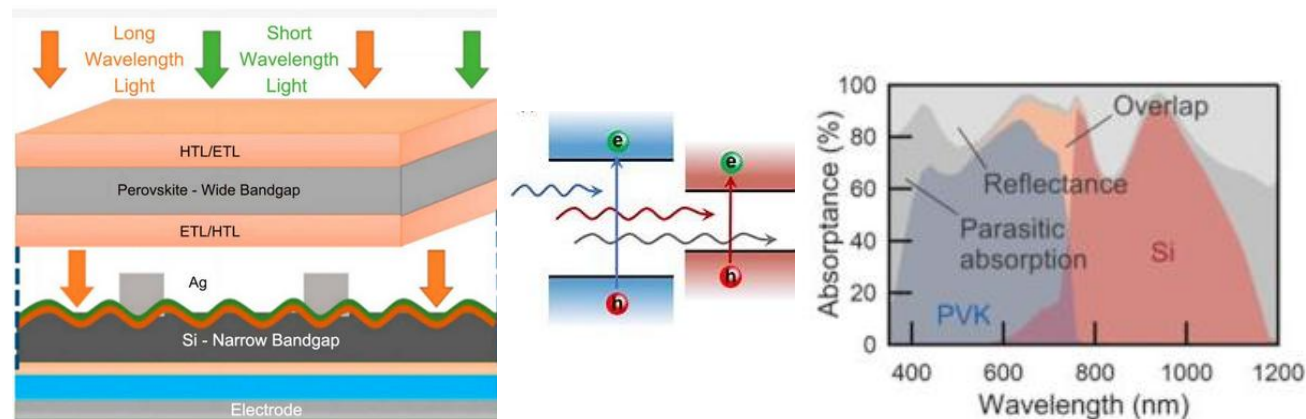
- 单结钙钛矿电池因稳定性不足（湿热环境下寿命仅10年左右，远低于晶硅的25-30年）和大面积制备效率骤降两大劣势，短期内难以独立实现商业化。
- 钙钛矿电池的商业化路径是钙钛矿/晶硅叠层电池，通过协同覆盖光谱实现高效率。钙钛矿/晶硅叠层电池是一种通过垂直堆叠宽带隙钙钛矿顶电池与窄带隙晶硅底电池实现光谱分段利用的高效光伏器件，其中宽带隙钙钛矿材料（1.6-1.8 eV）主要负责吸收300-800nm的紫外至可见光，生成电子-空穴对并在内建电场下分离，电子经顶电极导出，空穴则通过中间复合层传输；窄带隙（1.1 eV）晶硅电池如HJT或TOPCon，吸收透射的800-1200nm近红外光其光生载流子通过硅基PN结分离。两者协同覆盖超90%太阳光谱，大幅减少单一材料无法避免的热化和透射损失，从而突破单结电池效率极限。
- 钙钛矿/晶硅叠层电池的理论极限达43%。目前，隆基绿能叠层团队研发的两端叠层原型器件（1cm²）权威认证效率达到34.6%，并实现大面积（260.9cm²）叠层电池33%的认证效率。
- 钙钛矿/晶硅叠层电池核心优势包括：（1）钙钛矿/晶硅叠层电池通过复用成熟晶硅产业链基础与突破晶硅电池效率极限；（2）规避了单结钙钛矿电池的稳定性短板和大面积制备效率骤降问题；（3）钙钛矿电池相对晶硅电池具备高弱光效应，钙钛矿材料在阴雨天气和日出日落等弱光环境均能工作。

图21：钙钛矿/晶硅叠层电池理论效率与单晶硅电池和钙钛矿电池对比



资料来源：李白茹,等.钙钛矿太阳能电池研究进展[J].化工进展, 2025, 44(05): 2598-2624, 国信证券经济研究所整理

图22：钙钛矿/晶硅叠层电池机理



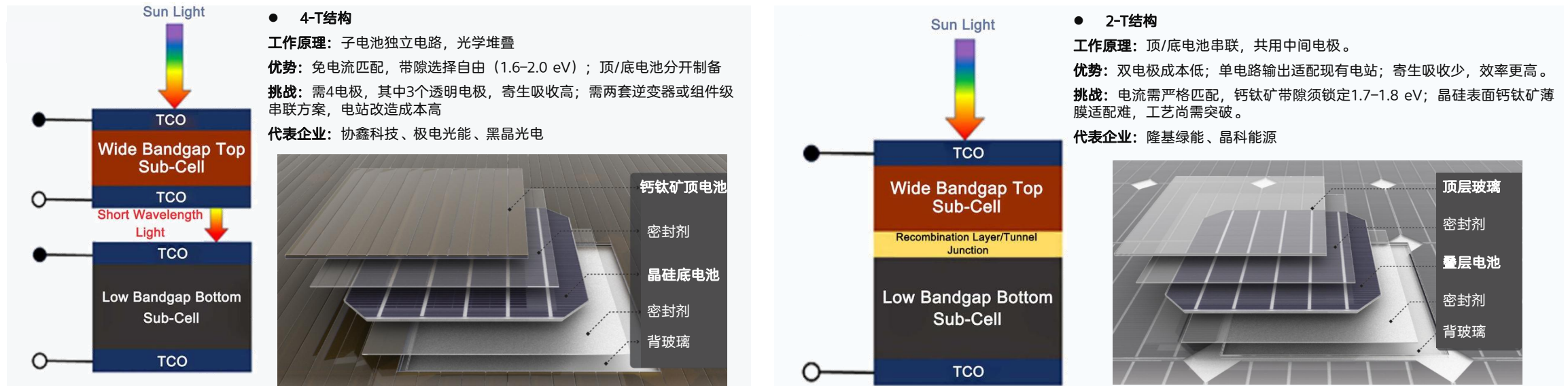
资料来源：Chi W, et al. Perovskite/silicon tandem solar cells: choice of bottom devices and recombination layers[J].

ACS Energy Letters, 2023, 8(3): 1535-1550., 韦协利. 钙钛矿/硅叠层太阳能电池：见解与展望[J]. 应用物理, 2024, 14(12): 753-764., 国信证券经济研究所整理

钙钛矿/晶硅叠层电池结构：4-T与2-T结构各有优劣，并行发展

- 钙钛矿/晶硅叠层电池采用垂直堆叠架构，由三层功能单元构成。顶层钙钛矿电池包括透明导电层（ITO/FTO）→ 电子传输层（ SnO_2 / TiO_2 ）→ 钙钛矿吸光层 → 空穴传输层（Spiro-OMeTAD/ NiO_x ）；中间连接层的作用是实现电学串联或光学耦合，减少界面反射与载流子复合，结构分为2-T和4-T两种，其中2-T结构为隧穿结（高掺杂多晶硅）或复合层（ITO/AZO薄膜），厚度5-40nm，4-T结构是透明电极通过银纳米线/超薄金属实现机械堆叠；底层为晶硅电池，多为TOPCon和HJT电池，其中HJT电池因表层自然存在透明导电氧化物与钙钛矿完美适配，可能成为主流路线。
- 两种电池结构各有优劣，未来将并行发展。4-T结构钙钛矿/晶硅叠层电池由钙钛矿技术领先的公司主导，主要优势是钙钛矿电池与晶硅电池相对独立，目前量产技术更为成熟，且电池柔性更好。但由于采用3个透明电极，成本较2-T电池高，另外需两套逆变器或组件级串联方案，使电站改造成本较高。2-T结构钙钛矿/晶硅叠层电池由晶硅电池公司主导，优势是兼容目前的晶硅电池产线，兼容电站，另外仅采用一个透明电极成本较低，但是在钙钛矿在晶硅绒面的覆盖上存在工艺不成熟的问题，钙钛矿层与晶硅层的电流需精确匹配。

图23：钙钛矿/晶硅叠层电池结构分类



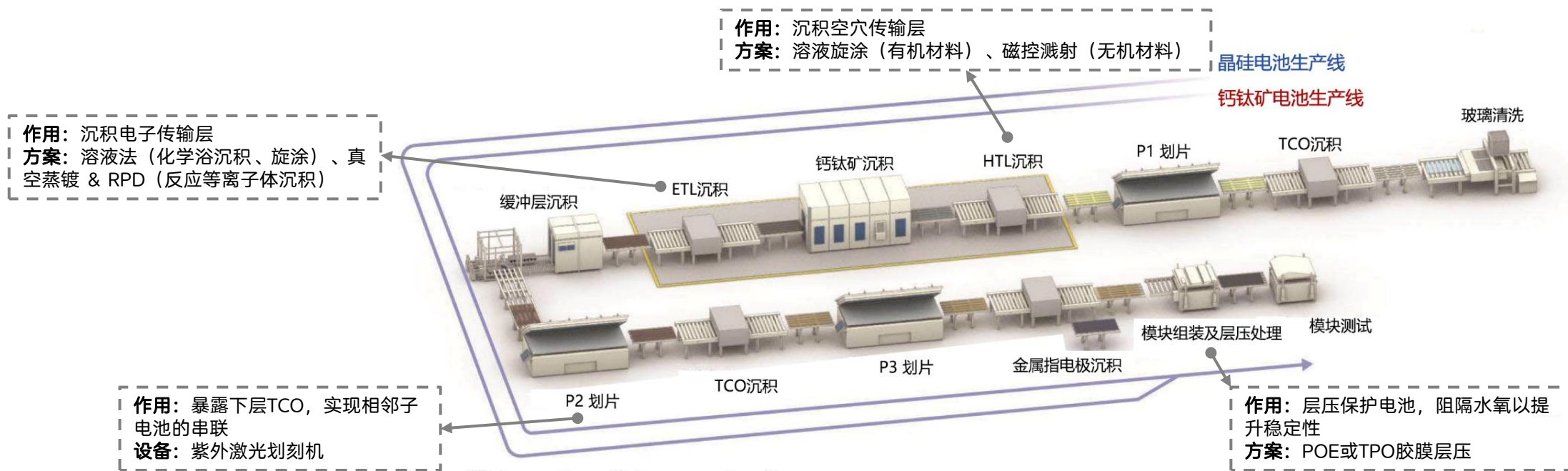
资料来源：Aydin E, et al. Pathways toward commercial perovskite/silicon tandem photovoltaics[J]. Science, 2024, 383(6679): eadh3849., 韦协利. 钙钛矿/硅叠层太阳能电池：见解与展望[J]. 应用物理, 2024, 14(12): 753-764., 国信证券经济研究所整理

请务必阅读正文之后的免责声明及其项下所有内容

4-T结构钙钛矿/晶硅叠层电池分别生产钙钛矿子电池和晶硅电池

- 4-T叠层生产线：分别制造钙钛矿子电池和晶硅电池，然后进行机械堆叠。钙钛矿子模块被制造在平面模块玻璃上，其可扩展沉积技术的选择与常规薄膜钙钛矿模块类似，具体工艺包括玻璃清洁、TCO沉积、钙钛矿沉积、ETL沉积以及钙钛矿电池的各种划片步骤（P1、P2、P3），以及组件组装、层压和测试。钙钛矿电池与晶硅电池完全独立生产，组件厂可直接采购晶硅电池。
- 钙钛矿沉积是核心流程，主要包括溶液法、气相法及干湿混合法三种方案。
- 电子传输层与空穴传输层的沉积也是钙钛矿子电池制造的关键流程。电子传输层（ETL）以溶液法为主，采用旋涂仪或狭缝涂布机，成本低适合大面积生产；真空法（PVD、RPD设备）用于沉积C₆₀材料，膜层均匀但设备成本高。空穴传输层（HTL）主要依赖磁控溅射设备（PVD）沉积无机材料，稳定性好；溶液旋涂用于有机材料，需旋涂仪实现低温加工。

图24：4-T结构钙钛矿/晶硅叠层电池工艺流程



资料来源：Aydin E, et al. Pathways toward commercial perovskite/silicon tandem photovoltaics[J]. Science, 2024, 383(6679): eadh3849., 国信证券经济研究所整理

- 一、航天科技与市场发展不及预期；
- 二、太空光伏技术研发进展不及预期。

国信证券投资评级

投资评级标准	类别	级别	说明
报告中投资建议所涉及的评级（如有）分为股票评级和行业评级（另有说明的除外）。评级标准为报告发布日后6到12个月内的相对市场表现，也即报告发布日后的6到12个月内公司股价（或行业指数）相对同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准。A股市场以沪深300指数（000300.SH）作为基准；新三板市场以三板成指（899001.CSI）为基准；香港市场以恒生指数（HSI.HI）作为基准；美国市场以标普500指数（SPX.GI）或纳斯达克指数（IXIC.GI）为基准。	股票投资评级	优于大市	股价表现优于市场代表性指数10%以上
		中性	股价表现介于市场代表性指数±10%之间
		弱于大市	股价表现弱于市场代表性指数10%以上
	行业投资评级	无评级	股价与市场代表性指数相比无明确观点
		优于大市	行业指数表现优于市场代表性指数10%以上
		中性	行业指数表现介于市场代表性指数±10%之间
	弱于大市	行业指数表现弱于市场代表性指数10%以上	

分析师承诺

作者保证报告所采用的数据均来自合规渠道；分析逻辑基于作者的职业理解，通过合理判断并得出结论，力求独立、客观、公正，结论不受任何第三方的授意或影响；作者在过去、现在或未来未就其研究报告所提供的具体建议或所表述的意见直接或间接收取任何报酬，特此声明。

重要声明

本报告由国信证券股份有限公司（已具备中国证监会许可的证券投资咨询业务资格）制作；报告版权归国信证券股份有限公司（以下简称“我公司”）所有。本报告仅供我公司客户使用，本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式使用、复制或传播。任何有关本报告的摘要或节选都不代表本报告正式完整的观点，一切须以我公司向客户发布的本报告完整版本为准。

本报告基于已公开的资料或信息撰写，但我公司不保证该资料及信息的完整性、准确性。本报告所载的信息、资料、建议及推测仅反映我公司于本报告公开发布当日的判断，在不同时期，我公司可能撰写并发布与本报告所载资料、建议及推测不一致的报告。我公司不保证本报告所含信息及资料处于最新状态；我公司可能随时补充、更新和修订有关信息及资料，投资者应当自行关注相关更新和修订内容。我公司或关联机构可能会持有本报告中所提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供或争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务。本公司的资产管理部门、自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告意见或建议不一致的投资决策。

本报告仅供参考之用，不构成出售或购买证券或其他投资标的的要约或邀请。在任何情况下，本报告中的信息和意见均不构成对任何个人的投资建议。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。投资者应结合自己的投资目标和财务状况自行判断是否采用本报告所载内容和信息并自行承担风险，我公司及雇员对投资者使用本报告及其内容而造成的一切后果不承担任何法律责任。

证券投资咨询业务的说明

本公司具备中国证监会核准的证券投资咨询业务资格。证券投资咨询，是指从事证券投资咨询业务的机构及其投资咨询人员以下列形式为证券投资人或者客户提供证券投资分析、预测或者建议等直接或者间接有偿咨询服务的活动：接受投资人或者客户委托，提供证券投资咨询服务；举办有关证券投资咨询的讲座、报告会、分析会等；在报刊上发表证券投资咨询的文章、评论、报告，以及通过电台、电视台等公众传播媒体提供证券投资咨询服务；通过电话、传真、电脑网络等电信设备系统，提供证券投资咨询服务；中国证监会认定的其他形式。

发布证券研究报告是证券投资咨询业务的一种基本形式，指证券公司、证券投资咨询机构对证券及证券相关产品的价值、市场走势或者相关影响因素进行分析，形成证券估值、投资评级等投资分析意见，制作证券研究报告，并向客户发布的行为。



国信证券

GUOSEN SECURITIES

国信证券经济研究所

深圳

深圳市福田区福华一路125号国信金融大厦36层

邮编：518046 总机：0755-82130833

上海

上海浦东民生路1199弄证大五道口广场1号楼12楼

邮编：200135

北京

北京西城区金融大街兴盛街6号国信证券9层

邮编：100032