



电力设备与新能源行业研究

买入（维持评级）

行业研究
证券研究报告

新能源与电力设备组
分析师：姚遥（执业 S1130512080001）
yaoy@gjzq.com.cn

太空光伏专题（一）技术篇：

从高可靠性迈向高性价比，超高壁垒铸就蓝海市场

投资逻辑：

我们重点看好“太空光伏”作为未来一段时间、乃至贯穿 2026 年的最强电新主线之一！太空光伏底层投资逻辑坚实而紧迫：1) 唯一性：光伏是当前及可见未来所有航天器长期在轨运行唯一可行、可靠的供电解决方案，技术路径无可替代；2) 紧迫性：国际电信联盟（ITU）确立的近地轨道与频谱资源“先占先得”规则，使得卫星发射数量与部署速度直接关乎国家空间战略优势与商业主动权，驱动卫星市场对高性价比、轻量化空间太阳能系统的迫切需求。后续围绕这一主线，我们将以系列深度报告的形式进行研究，本篇作为开篇，聚焦太空光伏技术的历史与未来，详解不同技术路线的特点，把握最前沿、最有应用潜力的技术投资方向。

唯一性——太空供电的必然选择：在功能卫星、算力星座的设计轨道环境中，乃至未来火星基地，太阳能是唯一能够实现长期、稳定、轻量化供电的能源形式。在极端环境中，持续能源的选择面极为有限，化学电池能量密度有限且无法自主补充；核能力系统成本高昂、审批复杂，相比之下，光伏技术可以直接、持续性地丰富的太阳光能量转换为电能，并且具备“高效、轻质、低成本、柔韧、抗极端环境”等特性，满足大规模、高功率卫星的部署和设计趋势。

迭代性——技术路线从“高可靠性”迈为“高性价比”：我们认为太空光伏的技术路线在高性价比诉求下将进入迭代阶段，短期晶硅是相对成熟、性价比较高的技术，长期纬度晶硅/钙钛矿叠层、钙钛矿多结电池有望得到快速的发展。当前三结砷化镓（GaAs）电池凭借其超高的效率和优异的抗辐照、耐温差性能，在卫星电源分系统的电池环节占据主导地位，但复杂的制备工艺和稀缺高昂的原材料价格使电池成本居高不下，难以满足未来 GW 级以上低成本商业卫星的大规模部署需求；晶硅电池具备成熟的地面产业化基础、极低的制造成本和历史在轨数据支撑，符合卫星市场的性价比诉求，市场渗透率正在逐步提升，但效率上和主流技术存在较大差距；出于对晶硅电池提效和稳定性的考虑，晶硅-钙钛矿叠层技术有望成为平衡高效率与低成本的下一代技术路线。

壁垒性——传统企业难以快速切入：太空光伏绝非仅是地面技术的简单升级，而是一个集尖端技术、极限测试与稀缺应用资源于一体的高壁垒领域。产品技术方面，太空环境中存在不同于地面的辐射、极端温度循环、全光谱照射、原子氧侵蚀等情况，与地面光伏提效和建立高可靠性的研发思路不同，太空光伏产品的开发需要以特定环境参数为基础、定向研究。地面测试验证方面，太空光伏产品需要依赖昂贵且稀缺的大型空间环境模拟装置进行长达数月甚至数年的地面可靠性验证，测试标准与数据积累构成深厚护城河。在轨应用渠道方面，与地面光伏需要央国企电站实证测试类似，太空光伏产品最终需要搭载航天器进行在轨验证与飞行应用，紧密依赖于航天系科研院所及卫星发射机会，客户粘性强，先发合作优势明显。因此我们认为长期从事航天领域、已进入供应链、具备完整空间环境模拟测试能力与工程化经验的“国家队”或战略科技企业有望在这一市场中率先获得良好卡位并表现出显著的先发优势。

投资建议与估值

针对商业航天加速以及太空算力规划所带来的太空光伏环节投资机会，我们建议关注三大方向：1) 具备独特卡位和先发优势的光伏电池片制造商；2) 光伏设备头部供应商；3) 太空环境特殊膜材料供应商。（完整推荐组合请参见正文）

风险提示

商业航天产业发展不及预期，电池技术迭代不及预期。

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费



内容目录

一、从太空光伏发展历史看技术趋势.....	4
二、太空光伏由“高性能”向“性价比”策略转型.....	5
2.1 太空环境中有什么？.....	5
2.2 三结砷化镓电池：高效、耐辐射，但资源稀缺导致价格居高不下.....	6
2.3 空间适用型晶硅电池：兼具性价比与实证历史，P 型、薄片化为适配方案.....	9
2.4 晶硅-钙钛矿叠层：效率对标砷化镓，成本对标晶硅的下一代技术展望.....	11
三、推荐标的.....	13
3.1 钧达股份：电池片龙头布局钙钛矿叠层，打造太空光伏引领者.....	13
3.2 东方日升：HJT 技术全球领先企业，空天场景打开 p 型特种产品市场空间.....	14
3.3 上海港湾：卡位卫星电源分系统，钙钛矿电池已进入在轨验证阶段.....	15
3.4 迈为股份：HJT 整线设备头部供应商，提效降本重要推动力量.....	15
3.5 捷佳伟创：光伏电池设备龙头，量产型设备积极推动钙钛矿产业化.....	16
3.6 瑞华泰：打破 PI 薄膜国际垄断，航天级产品已应用于运载火箭与空间站.....	16
风险提示.....	16

图表目录

图表 1：1958 年至今，太空光伏主流技术从晶硅迭代到砷化镓.....	4
图表 2：单星高功率趋势推动太阳翼向柔性化发展.....	4
图表 3：AM0 和 AM1.5g 光谱的强度和范围均有差异.....	5
图表 4：不同轨道高度环境成分不同.....	6
图表 5：砷化镓的光生伏特效应示意图.....	6
图表 6：GaAs 带隙宽度最佳.....	7
图表 7：直接带隙材料中，光子更容易被激发接收.....	7
图表 8：砷化镓自修复能力相对较强，仅结区附近的位移损伤影响较大.....	7
图表 9：三结砷化镓太阳能电池在中高轨道运行十年，电流衰减幅度不到 10%.....	7
图表 10：砷化镓电池外延层结构复杂.....	8
图表 11：砷化镓外延工艺流程.....	8
图表 12：镓在光伏中的应用仅占到总需求的 2%左右.....	8
图表 13：截至 2025 年 12 月底，锗价约为 12950 元/kg.....	9
图表 14：截至 2025 年 12 月底，镓价约为 1650 元/kg.....	9
图表 15：N 型硅损伤系数显著高于 P 型硅.....	9



图表 16: P 型硅的抗辐射衰减能力更优异.....	10
图表 17: BSF 衰减显著快于非 BSF 电池.....	10
图表 18: xBC 电池结构中载流子依赖基区横向传导.....	10
图表 19: perc 和 p-hjt 结构对比.....	11
图表 20: 钙钛矿材料中离子组合的种类丰富	11
图表 21: 钙钛矿电池具备相对最高的能质比（电池片口径）	12
图表 22: 空间钙钛矿电池稳定性评估建议清单	12
图表 23: 叠层电池光谱能量利用率提高	13
图表 24: 公司光伏电池片出货常年位居前五	14
图表 25: 尚翼光电已布局空间钙钛矿相关专利	14
图表 26: 钙钛矿太阳能电池已通过多次在轨飞行任务验证其稳定性和可靠性。	15
图表 27: 迈为 HJT 4.0 整线设备持续迭代	15
图表 28: 捷佳伟创 2025 年内钙钛矿设备订单及出货情况多元覆盖大客户、整线、柔性化等需求.....	16

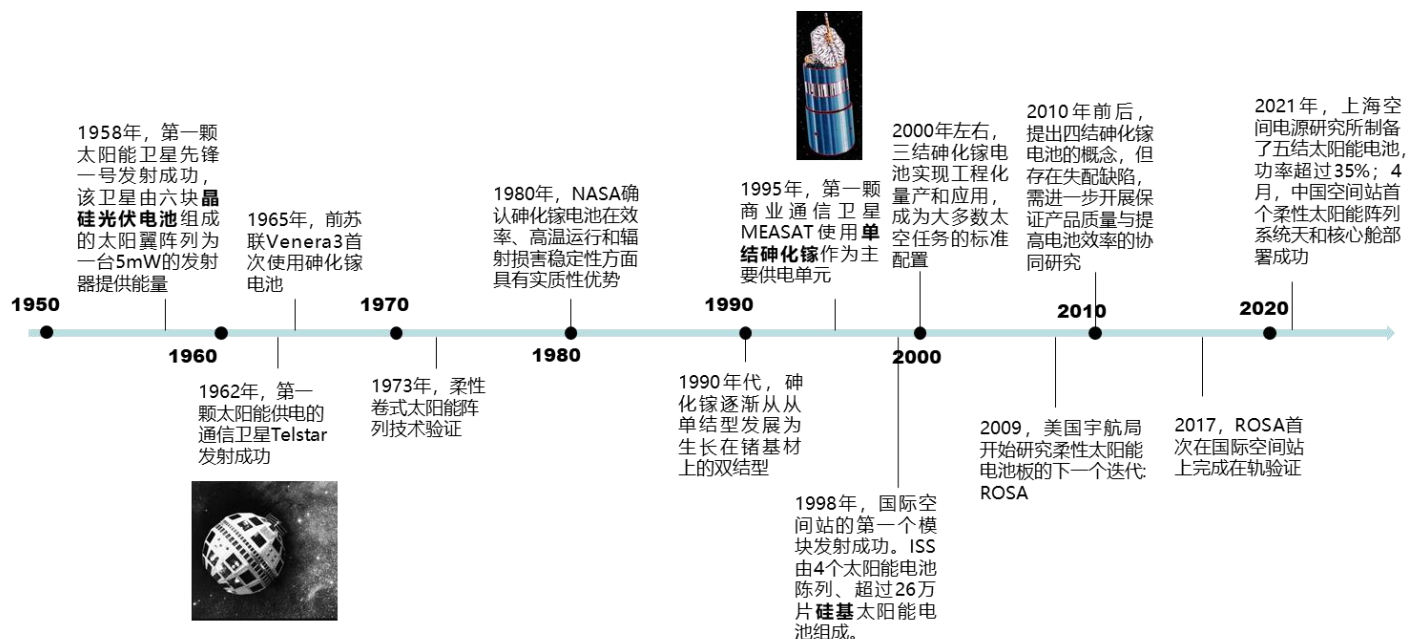


一、从太空光伏发展历史看技术趋势

太阳能在卫星上的应用最早可以追溯到 1958 年，美国先锋一号卫星采用六块晶硅光伏电池组成的太阳翼阵列为一台 5mW 的发射器提供能量，此后太阳能以及晶硅技术成为主流的卫星供电方案，电池效率从不到 10% 提升到 15% 以上。

1965 年，前苏联 Venera3 卫星首次使用砷化镓电池；1995 年，第一颗商业通信卫星 MEASAT 使用单结砷化镓作为主要供电单元，太阳能阵列设计提供了完整的数据库，并证明砷化镓电池满足航天器全生命周期供电需求，此后砷化镓电池逐步取代硅电池成为航天器的基本发电单元，并逐步从单结型发展为生长在锗基材上的多结型。

图表1：1958 年至今，太空光伏主流技术从晶硅迭代到砷化镓



来源：NASA, GUNTER'S SPACE PAGE, 硅酸盐学报, 美国能源部, SpaceNews, 《中国工程科学》杂志社, 中国载人航天工程, 中国科学院半导体研究所, 国金证券研究所

随着航天器有效载荷和性能需求持续推动更高的电力需求，解决空间能源需求已超越仅仅提升太阳能电池光伏转换效率，对功率比、存储空间、结构重量以及展开/收放能力的要求，加速了柔性技术结构的发展和进步。最早的刚性太阳翼作用于先锋一号，20 世纪 80 年代中国的东方红四号卫星也采用了典型的刚性太阳能电池阵列；同时期美国宇航局哈勃太空望远镜开始使用安装在柔性材料上的太阳能电池，2021 年 ROSA（展开式太阳能阵列）首次搭载成为飞行器驱动能源，同年中国空间站首个柔性太阳能阵列系统部署成功。

图表2：单星高功率趋势推动太阳翼向柔性化发展

	刚性太阳翼	折叠型太阳翼	柔性太阳翼
结构特征	结构坚固稳定，设计简单，技术成熟	多段刚性/半刚性太阳翼通过铰链连接折叠	电池片集成于超薄柔性基底
展开/收纳方式	蜂窝夹层/复合材料	铰链连接，机构展开	卷曲或薄膜折叠
适用场景	高稳定性和可靠性为第一约束的场景	功率要求相对较高，对稳定性相对敏感的场景	功率为第一约束，稳定性让位于系统效率
示例图			

来源：《中国空间可展开结构——进展与趋势》，《Surveying the potential of flexible and high-specific-power photovoltaic assemblies and arrays for space applications》，国金证券研究所



二、太空光伏由“高性能”向“性价比”策略转型

2.1 太空环境中有什么？

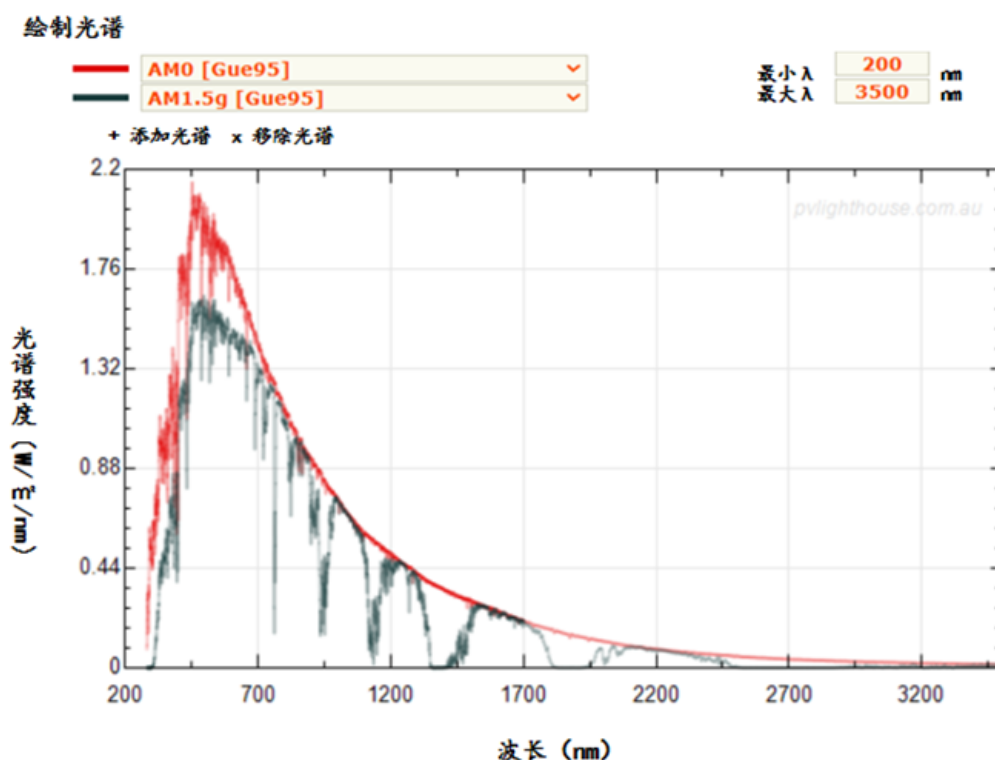
对太阳能电池而言，太空环境与地面环境的主要差异可以总结为三点：光照强度和光谱范围；水、氧、太空辐射等物质；温度。

1) 光照强度和光谱范围

太阳光的辐照强度随着与太阳的距离越远而减弱，由于大气层对太阳光有反射、漫散射、吸收等作用，实际达到地面的太阳辐照强度只有 30% 左右，研究上将地面接收到的太阳光称为标准光谱 AM1.5g，光强定义为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ；太空中的太阳光谱称为 AM0，光强约为 $1361\text{W}/\text{m}^2$ 。

同时太阳光谱范围有着巨大的差异，在太阳光穿过大气层到达地表的过程中，波长小于 300nm 的光（紫外波段）被大气层中的氧气、臭氧、氮气吸收，波长为 900nm、1100nm、1400nm、1900nm 的光（近红外）被水蒸气吸收，1800nm 及 2600nm 的光（短波红外）被 CO_2 吸收，中波、长波红外光几乎无法到达地面。

图表3：AM0 和 AM1.5g 光谱的强度和范围均有差异



来源：pvlighthouse，国金证券研究所

2) 水、氧、太空辐射

不同于大气层内是一个充满了水、氧气的环境，在绝大多数太空环境中，水和氧的丰度极低，可以近似认为是“极端真空”或“接近绝对真空”，但不同的轨道高度仍然面临不同的原子或质子影响。

低地球轨道（LEO）定义为离地表 20-1200km 的高度范围，环境中原子氧（AO）含量高达 80%-90%，分子氮（ N_2 ）约占 10%-20%，随着轨道高度增加，各组分密度有所减小，而原子氧的高密度（ $>10^5/\text{cm}^3$ ）会一直维持到 700km 以上，因此也成为低轨环境中对航天器影响最为重要的因素之一。

在轨道上，原子氧和航天器的相对运动速度较大，原子氧相对动能高达 5eV 左右，足以引起表面材料的化学反应；并且原子氧本身具有强氧化性，可以与表面材料直接发生反应，产生氧化、溅射和剥蚀等作用。

中地球轨道（MEO，1200-36000km）及地球同步轨道（GEO，36000km），涉及地球外辐射带中心区域，外辐射带的电子能量可以高达 MeV，同时电子通量随着时间或空间有数个量级的变化，是一个完全动态的系统；而 MeV 级别的高能电子具有极强的穿透性，同时可以通过充放电效应破坏太阳翼。



图表4：不同轨道高度环境成分不同

	高度	主要成分	特点	在轨卫星种类
低地球轨道（LEO）	20-2000km	N ₂ 、O ₂ 、Ar、He、H 和 O	原子氧含量约为 80%、氮分子含量约为 20%、气体总压为 10 ⁻⁸ -10 ⁻⁵ Pa	遥感卫星、通信卫星、空间站
中地球轨道（MEO）	2000-36000km	高能粒子、原子氢、原子氮	几乎无原子氧和氮分子、存在高能粒子辐射、深层充电	导航卫星
地球同步轨道（GEO）	36000km	高能粒子、热等离子体、空间碎片	高能电子通量极高、几乎无原子氧和氮分子、深层充电	通信卫星、导航卫星

来源：《商业卫星和配套设备研制及应用技术开发》，国金证券研究所

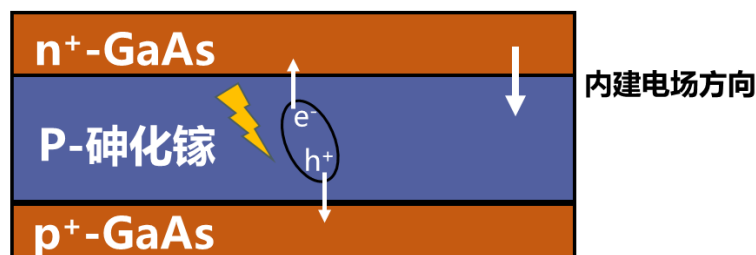
3) 温度

太空是一个冷黑背景，航天器在受到太阳辐照时温度急剧上升，当运行到地球阴影区时，温度又急剧下降；例如空间站每 90 分钟绕地球一圈，也就完成一次“昼夜交替”，向阳时航天器表面温度飙升至 150℃ 以上，背阴时温度骤降至 -100℃ 以下，这对要求电池片在短时间的极大温差下仍能保证稳定的发电能力提出了较高的要求。

2.2 三结砷化镓电池：高效、耐辐射，但资源稀缺导致价格居高不下

砷化镓（GaAs）是一种三五族化合物半导体材料，与传统地面太阳能电池的光伏原理类似，光照射到砷化镓为其提供光子能量，激发价带中的电子产生电子-空穴对，电子-空穴对在内置电场（PN 结）的作用下分离，并在 PN 结两端积累形成光生电压，也就是光生伏特效应。

图表5：砷化镓的光生伏特效应示意图

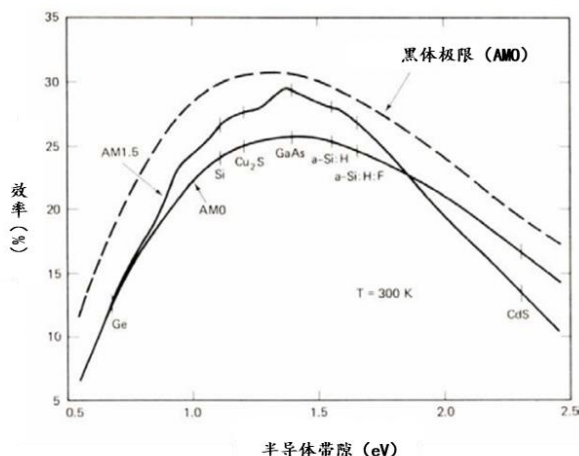


来源：国金证券研究所绘制

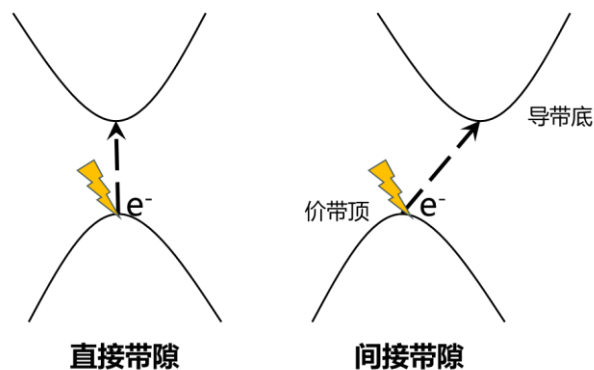
这一过程中，价带顶和导带底的相对位置、带隙宽度与太阳光谱的匹配程度使得砷化镓具备较晶硅更优异的光电转换效率：1) 砷化镓是直接带隙材料，更容易被光子激发；2) 砷化镓的带隙宽度为 1.42eV，根据 S-Q 极限原理，材料越接近 1.34eV，越能获得更高的光电转换效率极限。

三结电池的理论极限效率是 51%，根据 NREL，三结及以上砷化镓电池基于小面积（<1cm²）的地面实验室效率纪录为 39.46%，大面积（>10cm²）的地面实验室效率纪录为 34.1%，考虑 AMO 光谱及温度对电池效率的影响，目前，航天器电源主流的 GaInP/Ga(In)As/Ge 三结太阳能电池的光电转换效率可达 30% 以上。

图表6: GaAs 带隙宽度最佳



图表7: 直接带隙材料中, 光子更容易被激发接收



来源:《Solar Power Technologies for Future Planetary Science Missions》,

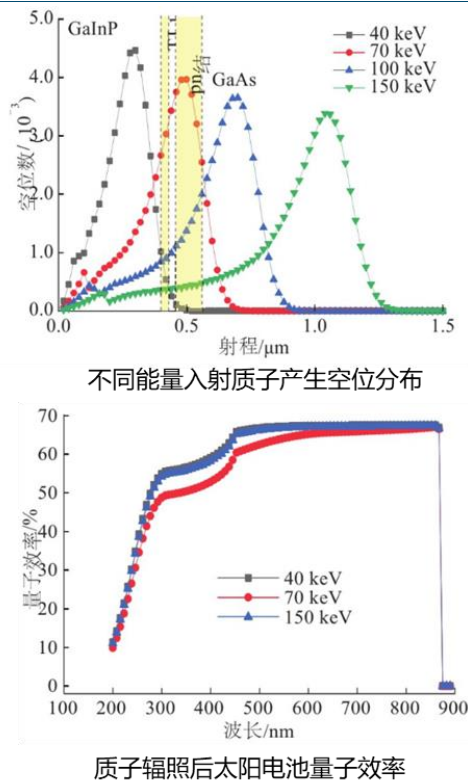
来源: 国金证券研究所绘制

国金证券研究所

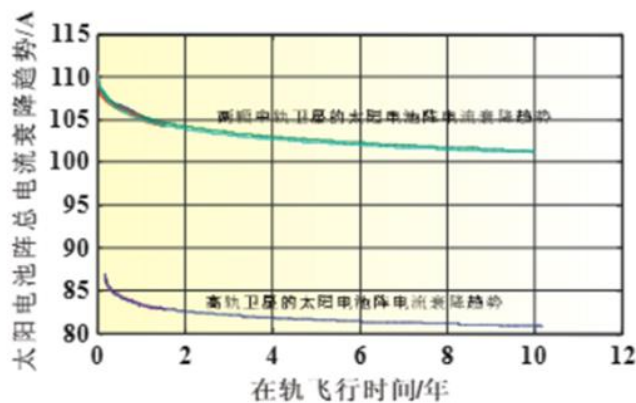
在空间辐射环境下,位移效应是光伏电池损伤的本质原因,例如半导体材料中的晶格原子在受到宇宙辐射(高能粒子)碰撞后脱离正常位置,位移形成“空穴-间隙原子对”,这类缺陷作为复合中心会导致光伏器件少子寿命下降、载流子浓度降低、少子迁移率下降,进而体现为电池效率衰减。

而实验表明,砷化镓具备较为优异的耐辐射能力,主要原因 1) GaAs 是极性半导体,原子间的结合兼具共价键和离子键特征,且 Ga-As 键长短,原子核对外层电子的吸引力较强,要使原子位移所需要的能量更高。2) GaAs 内部缺陷达到一定峰值后,进入“自退火”过程,缺陷复合并最终达到相对稳定的状态。3) GaAs 是直接带隙半导体,电子被激发到导带所需能力较低,即使载流子寿命和迁移率在辐射下降低,仍有大部分载流子能被电场收集,效率衰减速度相对平缓。

图表8: 砷化镓自修复能力相对较强, 仅结区附近的位移损伤影响较大



图表9: 三结砷化镓太阳电池在中高轨道运行十年, 电流衰减幅度不到 10%



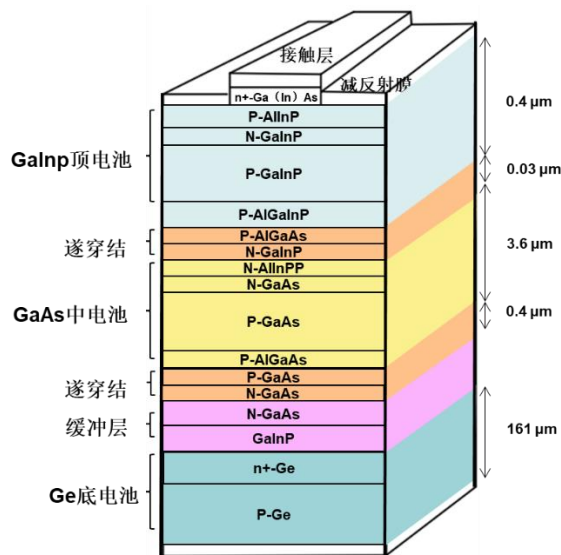
来源:《质子辐照下三结 GaAs 太阳电池性能衰退分析》, 国金证券研究所

来源:《三结砷化镓太阳电池在中高轨道性能表现研究》, 国金证券研究所

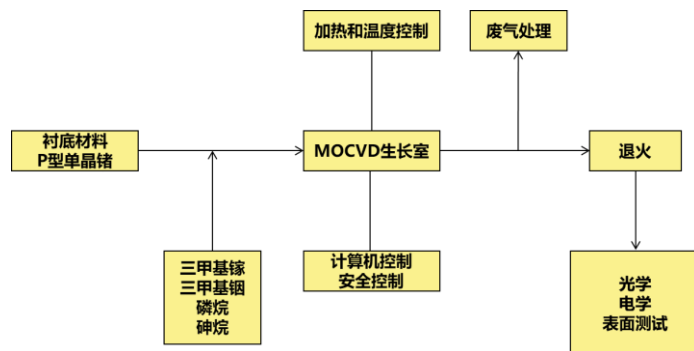


然而，与晶硅电池制作 PN 结需要进行元素掺杂一样，三五族化合物本身是本征的，也就是没有 N 或 P 的导电类型区分，因此需要在外延或者化学气相沉积（MOCVD）的过程中进行掺杂，这也使得空间场景应用的三结砷化镓电池结构及其复杂，一般需要生长近 30 层外延，并且外延结构的设计、每一层外延生长质量都直接影响整个砷化镓太阳能电池的性能。

图表10：砷化镓电池外延层结构复杂



图表11：砷化镓外延工艺流程



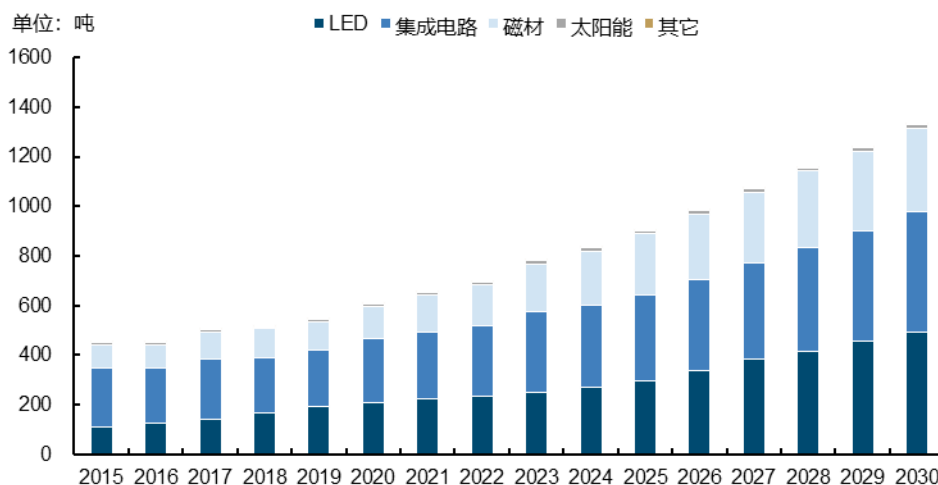
来源：《边缘湿法刻蚀 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池研究》，国金证券研究所

来源：乾照光电招股书，国金证券研究所

除了制备难度以外，现阶段在 Ge 衬底和 GaAs 衬底上外延砷化镓是最主流也最成熟的方案。锗和镓的全球储量资源稀缺、分别约为 8600 吨/23 万吨，且锗和镓多以伴生矿形式出现，开采难度较大，2024 年产量分别约为 220 吨/760 吨，假设全球每年发射 1 万颗星且单星太阳翼面积为 100 m²，若全部使用三结 GaAs 电池，测算 Ge 和 Ga 的用量约为 850 吨/10 吨。

资源紧缺导致价格昂贵，2025 年初，锗价一度攀升至接近 20000 元/kg，镓价也基本位于 1600 元/kg 左右，远高于铁、铜、铝等常见金属，并且考虑其战略价值和应用前景，价格具有较强支撑。

图表12：镓在光伏中的应用仅占到总需求的 2%左右



来源：CSIRO，国金证券研究所



图表13：截至2025年12月底，锗价约为12950元/kg



图表14：截至2025年12月底，镓价约为1650元/kg



来源：ifind，国金证券研究所

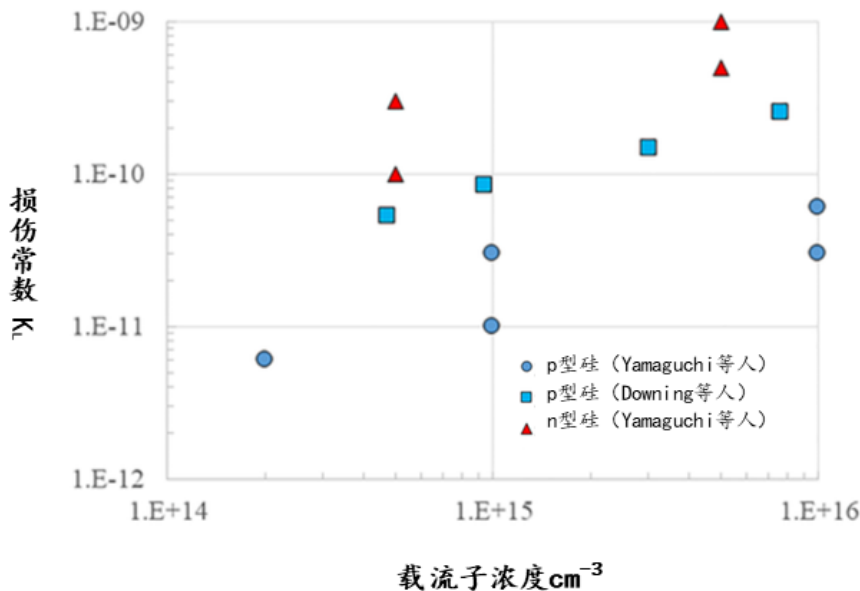
来源：ifind，国金证券研究所

2.3 空间适用型晶硅电池：兼具性价比与实证历史，P型、薄片化为适配方案

在空间光伏需求激增与低轨卫星群成本削减压力并存的背景下，太空光伏技术从传统“优质高端”向“性价比”策略转型。晶硅电池在太空供能中有着重要的历史地位和现实应用，同时又在地面场景大规模产业化发展的漫漫长河中，制造成本大幅下降，有望随着卫星市场的商业化提速而迅速渗透。

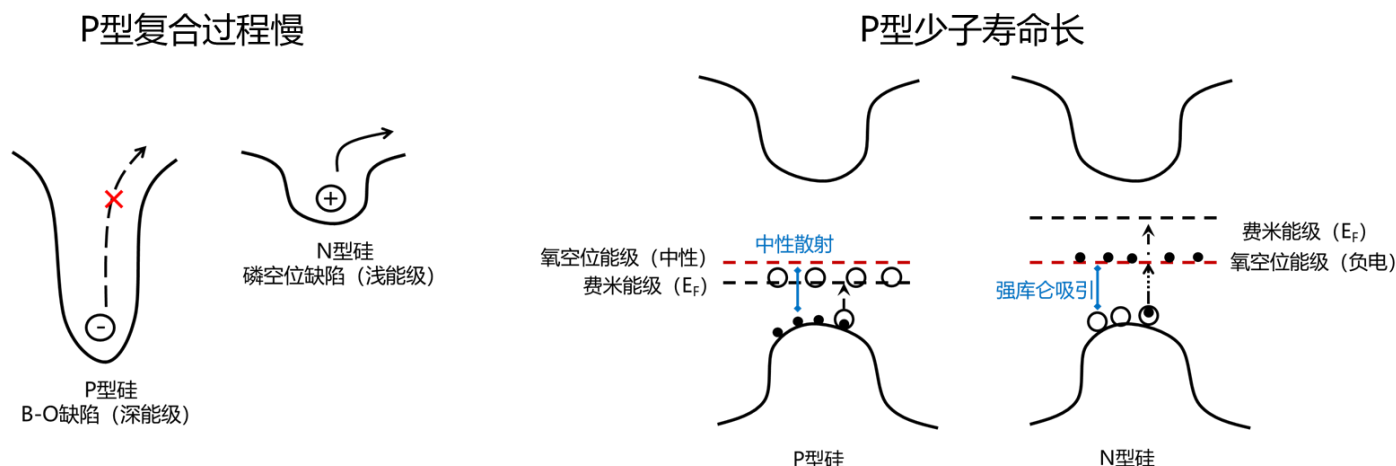
不同于地面市场在提效导向下已经从P型主流迭代到了N型时代，P型晶硅在太空这类高辐射的特殊场景下反而表现出更为优异的抗衰减特性：1) P型硅内的B-O复合缺陷对的能级较深，少子被捕获后难以再热激发回能带，缺陷中心复合过程慢；2) 高能粒子辐照容易形成氧空位缺陷，这类缺陷在P型硅中对少数载流子（电子）的俘获几率较低，少子寿命相对更长；3) 高能粒子撞击所形成的缺陷，易使N型硅转变为P型，导致PN结构失效。

图表15：N型硅损伤系数显著高于P型硅



来源：《Analysis for nonradiative recombination loss and radiation degradation of Si space solar cells》，国金证券研究所

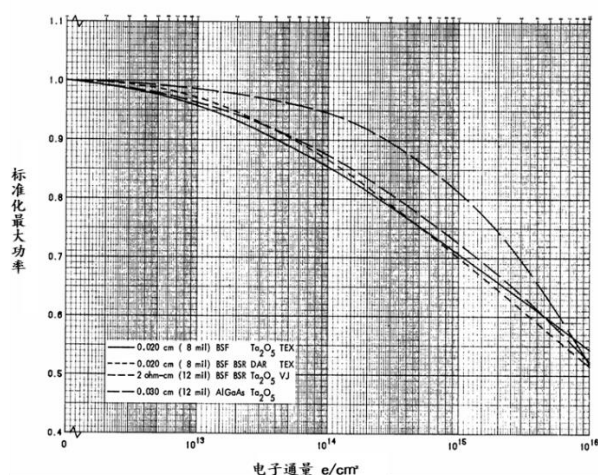
图表16: P型硅的抗辐射衰减能力更优异



来源:《A Detailed Model to Improve the Radiation-Resistance of Si Space Solar Cell》, 国金证券研究所绘制

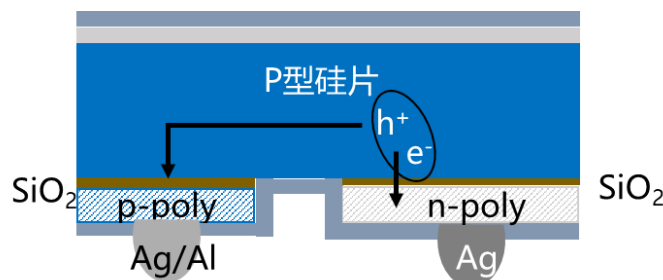
P型晶硅技术路线可选的有BSF、PERC、P-HJT、P-IBC, 其中BSF电池在高压辐照下, 背表面场对效率的优势会消失, 功率显著衰减; xBC电池由于P区和N区都在电池背面, 电流依赖基区横向传导, 缺陷所导致的电阻率增加, 即使是极其微小的, 也会引起巨大的串联电阻损耗, 导致输出功率显著下降。

图表17: BSF衰减显著快于非BSF电池



来源: NASA, 国金证券研究所

图表18: xBC电池结构中载流子依赖基区横向传导



来源: 2023 xBC 电池与技术论坛, 国金证券研究所

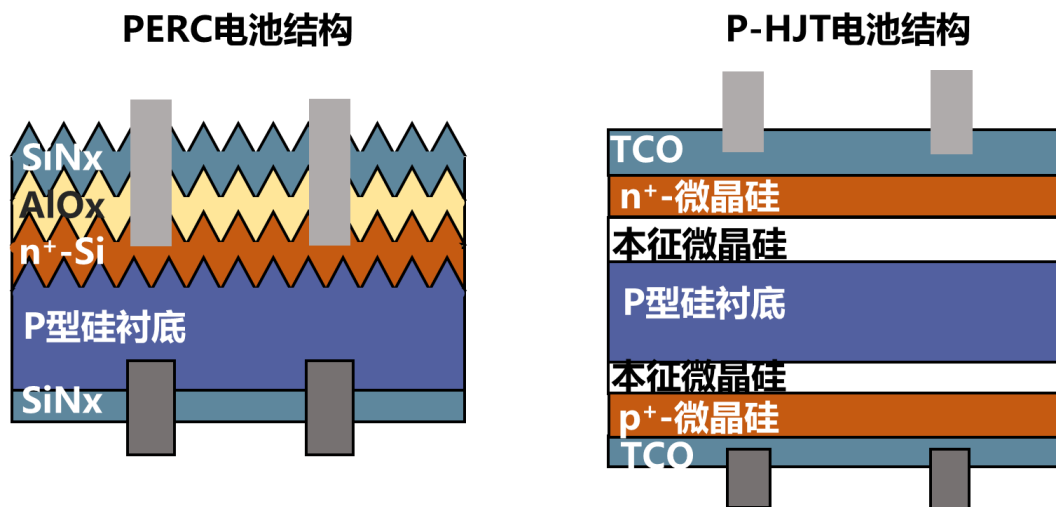
在剩下的技术选择中, PERC 在空天应用场景的成熟度更高, P-HJT 则是在效率、薄片化方面具备显著优势。

1) 根据《Investigation of p-type Silicon Heterojunction Radiation Hardness》, 60um 硅片厚度的 HJT 电池效率与 180um 硅片厚度的 PERC 电池基本持平。在卫星太阳翼上使用薄片化电池不仅是能满足其柔性的需求, 还与电池效率的衰减幅度有关, 硅片越厚, 少数载流子扩散长度越长, 辐射诱导的缺陷会大幅降低载流子的扩散长度, 导致基区载流子收集概率下降, 效率衰减更快。

2) 结构是电池效率的重要因素, PERC 采用氧化铝/氮化硅钝化结构, 主要原理是化学钝化和场效应钝化; HJT 采用非晶硅钝化, 用异质结构取代同质结, 开路电压更大; HJT 结构对称、具有超高双面率; HJT 为低温制程, 对少子寿命的影响较低, 提升短路电流。



图表19: perc 和 p-hjt 结构对比

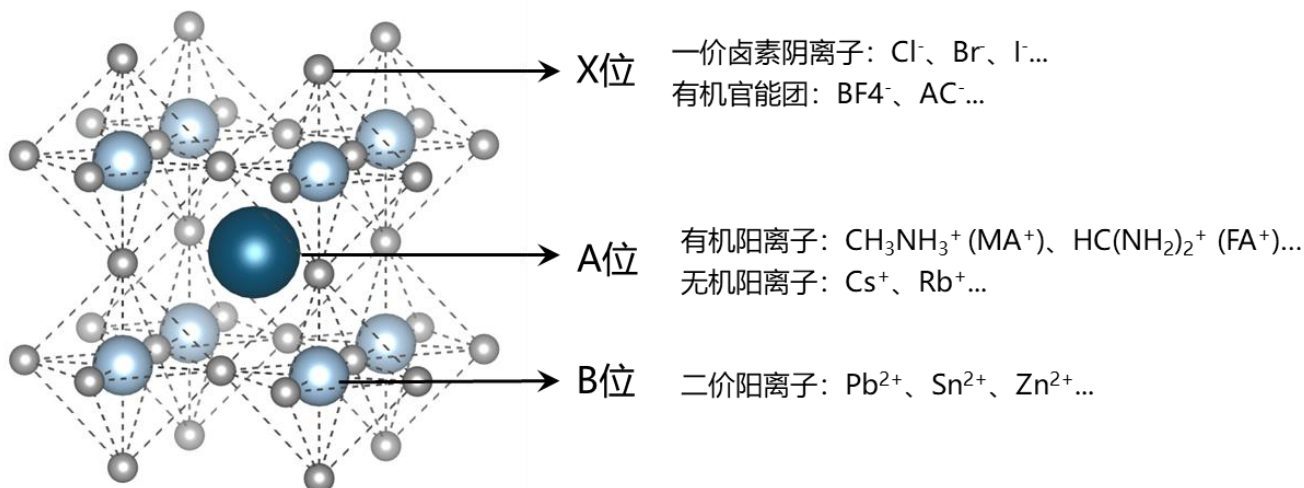


来源:《A Comparative Study on p- and n-Type Silicon Heterojunction Solar Cells by AFORS-HET》,《晶硅太阳能电池钝化层技术研究进展》,国金证券研究所绘制

2.4 晶硅-钙钛矿叠层:效率对标砷化镓,成本对标晶硅的下一代技术展望

钙钛矿是 ABX_3 结构立方晶系化合物的统称, A、B、X 位被三种不同类型的离子占据, 每个类型对应的种类丰富的具体离子, 不同的离子组合可以获得物理特性不同的钙钛矿材料。A 位离子决定钙钛矿材料的体系, 目前常用甲胺离子(简写 MA^+ , 分子式 $CH_3NH_3^+$)、甲脒离子(简写 FA^+ , 分子式 $HC(NH_2)_2^+$)、铯离子(Cs^+), 其中采用铯离子为全无机钙钛矿配方。

图表20: 钙钛矿材料中离子组合的种类丰富



来源:《掺杂与界面修饰增强钙钛矿太阳能电池性能的研究》,国金证券研究所绘制

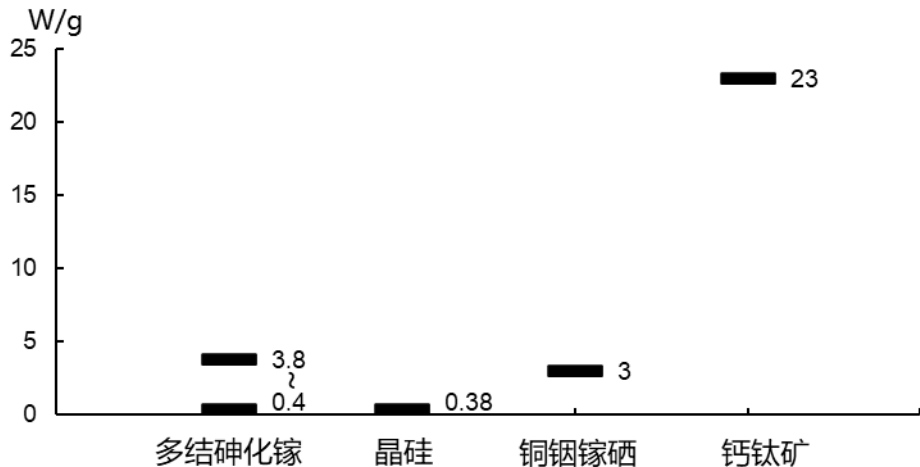
钙钛矿在地面端的产业化推进艰难, 最主要的原因是钙钛矿是盐类, 在制造过程中或制造过程之后, 一旦接触到水分子就容易降解, 在潮湿的环境中仅仅几个小时就可能致器件完全失效; 同时钙钛矿在地面端还会受到高温和氧气的影响, 然而有研究发现将钙钛矿电池封装在透明空间级硅胶密封胶中, 放置于超过 880h 的湿热环境 ($30^\circ C \pm 5^\circ C$, 95% 相对湿度) 下, 封装样品的化学计量未发生任何可检测的变化, 侧面反映当处于缺乏水汽和分子氧的太空环境下, 钙钛矿降解的两大不利因素自然消除, 甚至可以简略组件封装端的需求。

除此之外, 钙钛矿晶体表现出对缺陷极高的耐受性, 因为钙钛矿中的缺陷能级是在价带或导带内形成的, 而非在带隙中形成, 不会导致非辐射复合, 研究表明钙钛矿太阳能电池抗高能量和高通量辐射的能力, 优于目前在太空中使用的基于硅和三五族半导体的传统光伏技术。

钙钛矿材料的光吸收系数高, 膜厚仅需几百纳米, 使钙钛矿电池具备较高的能质比, 柔性单结钙钛矿能质比约为 $30W/g$, 相对晶硅电池、三结砷化镓电池均不到 $1W/g$, 钙钛矿更适合满足航天器对轻量化能源系统的需求, 有望成为空间光伏的优选材料。



图表21：钙钛矿电池具备相对最高的能质比（电池片口径）



来源：《Solar Energy in Space Applications: Review and Technology Perspectives》，国金证券研究所

而由于应用环境的变化，太空钙钛矿材料的配方和测试条件实际与地面有显著不同。在空间环境中影响钙钛矿电池的主要因素是热循环高真空、质子辐射、电子辐射、伽马射线、紫外射线，例如研究表明通过引入额外的碘离子来控制碘相关缺陷的存在，可以增强钙钛矿对质子辐射的抵抗力，但对于地面钙钛矿配方而言，碘离子易氧化，在光照或湿度下可能加剧钙钛矿的分解。

从测试标准来看，地面光伏组件在可靠性认证上通常采用双 85 测试（温度 85℃、湿度 85%RH），但对于每 90 分钟经历一次±150℃极端热冲击的太空钙钛矿电池，目前的测试方法并不契合。而更重要的，除了热循环测试、质子辐照测试等等，原子氧测试和抗振动方面的测试资源是目前行业最为欠缺的。

图表22：空间钙钛矿电池稳定性评估建议清单

关键因素	测试条件	测试类型
热冲击	增强等级 (TC-2)：±100℃（温度上升速率≥1.67℃/min） 增强等级 (TC-2)：±120℃（温度上升速率≥2℃/min） 极限级 (TC-3)：±150℃（温度上升速率≥2.5℃/min）	
测试周期	基础等级：1000 周期（3 个月任务模拟）； 提升等级：20,000-30,000 循环（3-5 年任务模拟）	热循环测试规范
评估标准	结构完整性：未观察到层间剥离或电极脱落； 光伏性能：衰减≤初始值的 15%（在 AM1.5G、单日光照测量）	
高能粒子辐射抵抗	基础等级 (PI-1)：0.1MeV, 3x10 ¹³ p/cm ² ; 2MeV, 6.6x10 ¹⁴ p/cm ² （三年任务模拟）； 增强等级 (PI-2)：0.1MeV, 1x10 ¹⁴ p/cm ² ; 2MeV, 2.2x10 ¹⁵ p/cm ² （十年任务模拟）	
评估标准	光伏性能：效率衰减≤15%（基础等级）； 效率衰减≤20%（提升等级）； 暗电流增加≤30%	质子辐照测试规格
振动耐久	发射阶段模拟：宽带随机振动 5-2000Hz, 加速度谱密度 10-20g ² /Hz, 持续时间≥3 分钟, 三轴载荷； 轨道相位模拟：高频微振动 10-1000Hz, 加速度谱密度：0.1-5g ² /Hz, 模拟部署机制 动态负载, 时长≥10 小时；	抗震测试
评估标准	弯曲测试规范：弯曲半径 1 毫米, 循环计数 105 弯曲后效率衰减≤8%；没有基底开裂或电极断裂	
原子氧侵蚀抵抗	通量 3×10 ²⁰ 个原子/cm ² ，AO 能量 5-8eV, 束流均匀度≥95%，全封装设备（三年任务模拟）	测试规范



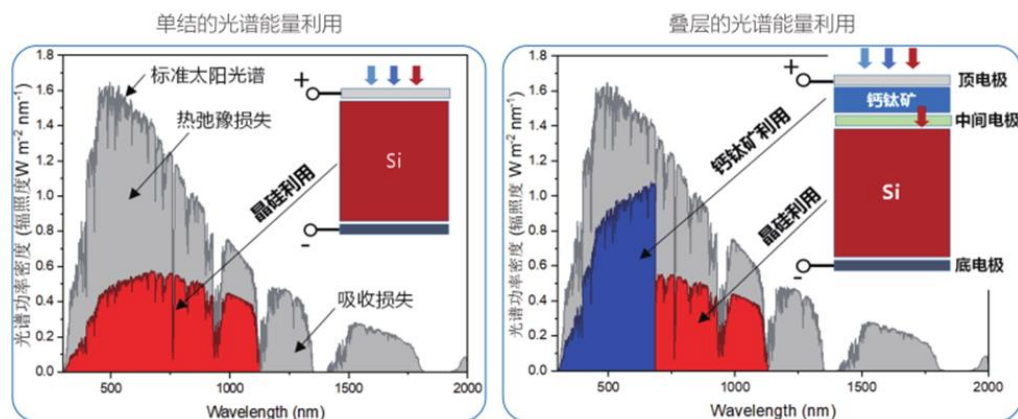
关键因素	测试条件	测试类型
评估标准	质量损失率 $\leq 5\%$ ；850nm 波长下的透射衰减 $\leq 10\%$ ；短路电流（ISC）降解 $\leq 15\%$	
耐潮性	在环境舱中，45° C/95% 相对湿度的恒定条件下储存 3 个月	
评估标准	封装层的吸水率 $\leq 3\%$ ；器件串联电阻增加 $\leq 20\%$ 没有发现明显的霉斑或电解液泄漏	湿度测试规范
能质比（分级）	A 级： $> 2.5 \text{ W/g}$ （效率： $> 25\%$ ） B 级： $1.8\text{--}2.2 \text{ W/g}$ （效率： $22\% - 24\%$ ） C 级： $1.2\text{--}1.5 \text{ W/g}$ （效率： $18\% - 20\%$ ）	定义
排气测试	该装置置于 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 真空环境下，温度为 125°C (257°F)，并运行 24 小时。随后，测试了其总质量损失（TML）和收集的挥发性冷凝材料（CVCMS）。	逸气测试规范
评估标准	$\text{TML} \leq 1\%$ ； $\text{CVCMS} \leq 0.1\%$	

来源：《Advancements in radiation resistance and reinforcement strategies of perovskite solar cells in space applications》，国金证券研究所

此外，在低成本迭代路线上，要想获得可以对标三结砷化镓电池的转换效率，多结叠层技术是必要方案，钙钛矿材料的带隙可调特征和薄膜形态，使得可以轻松地与传统晶硅电池叠加使用。根据 SCI 论文《Opportunities and challenges for tandem solar cells using metal halide perovskite semiconductors》中的计算，晶硅电池带隙 $\sim 1.1 \text{ eV}$ ，与带隙范围 $1.6\text{--}1.75 \text{ eV}$ 的钙钛矿材料搭配，可以实现接近 44% 的理论极限效率。

在晶硅电池的太空应用已经具备案例和成熟性认证的情况下，晶硅-钙钛矿叠层电池被认为是帮助晶硅电池效率快速提升的重要途径之一，也有望较快得到终端客户试样验证。

图表23：叠层电池光谱能量利用率提高



来源：中国科学技术大学碳中和研究院，国金证券研究所

三、推荐标的

针对商业航天加速以及太空算力规划所带来的太空光伏环节投资机会，我们重点推荐三大方向：1）光伏电池片制造商：钧达股份、东方日升、上海港湾、协鑫科技；2）光伏设备头部供应商：迈为股份、捷佳伟创；3）太空环境特殊膜材料供应商：瑞华泰、赛伍技术。

3.1 钧达股份：电池片龙头布局钙钛矿叠层，打造太空光伏引领者

公司是专业化电池片头部制造商，深耕光伏电池技术近 20 年，经历了 BSF→PERC→TOPCon 一系列电池技术路线迭代，是全球光伏电池出货量领先的供应商之一。在地面电池路线上，公司 N 型 TOPCon 电池已经实现了 26.09% 的认证转换效率；中试 xBC 电池转化效率较主流 N 型电池效率可提升 1-1.5 个百分点；与外部机构合作研发的钙钛矿叠层电池实验室效率达 32.08%，2025 年 11 月成功实现首片产业化 N 型+钙钛矿叠层电池下线，攻克底电池结构优化、高效介质钝化膜沉积等核心技术，已具备独立开展叠层工艺研发与小规模生产的能力。



图表24：公司光伏电池片出货常年位居前五

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	25H1
1	通威	通威	通威	通威	通威	通威	通威	通威	通威
2	茂迪	爱旭	爱旭	爱旭	爱旭	爱旭	爱旭	中润	中润
3	昱晶	展宇（捷泰）	中宇	润阳	润阳	润阳	中润	捷泰	英发
4	爱旭	联合再生能源	展宇（捷泰）	潞安	中宇	中润	捷泰	英发	捷泰
5	英稳达	茂迪	润阳	中宇	潞安	捷泰	润阳	爱旭	爱旭

来源：infolink，国金证券研究所

2025 年 5 月，公司 H 股于联交所主板挂牌上市，成为行业首家“A+H”双资本平台运作的光伏企业，全面打通境内外资源通道，为公司的技术研发、战略并购、新业务拓展提供坚实资本支撑。

2025 年 12 月 22 日，公司公众号发布与尚翼光电正式签署《战略合作框架协议》相关情况，将以战略股东身份对尚翼光电进行股权投资，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。

尚翼光电核心技术源于中科院上海光机所，是国内稀缺的卫星电池专业生产商，在航天应用场景理解、系统集成及工程验证方面具备长期积累，目前已完成太空环境下钙钛矿材料第一性原理验证。尚翼光电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。

图表25：尚翼光电已布局空间钙钛矿相关专利

申请日	申请号	发明名称	摘要
2025. 07. 29	CN202511049993. 6	封装胶膜层制备方法、柔性钙钛矿电池	该专利其目的在于解决现有技术中钙钛矿电池无法适用于太空环境严苛条件的技术问题。 专利核心思路是通过“材料创新+结构设计”，给柔性钙钛矿电池做一套全方位防护，具体包括： 1. 内层特制 POE 材料封装胶膜隔水隔氧； 2. 顶层加固并且在顶层和侧面采用疏水涂层防水防污； 3. 额外设置辐射制冷涂层应对太空极端温度、粘接减震层应对太空震动、冲击，配合太阳翼基板，让整个电池结构更稳定，适配太空复杂环境
2025. 08. 29	CN202511226907. 4	空间高温环境耐受的钙钛矿电池及其制备方法	该钙钛矿电池包括依次堆叠的衬底、导电层、空穴传输层、第一氧化物层、钙钛矿吸光层、第二氧化物层、电子传输层、界面层和金属电极层，其中：空穴传输层的材料采用氧化镍；第一氧化物层和第二氧化物层的晶体结构为钙钛矿晶体结构；钙钛矿吸光层材料采用 ABX₃ 型结构的无机金属卤化物；界面层材料采用金属铬。 该专利改善了钙钛矿电池在高温条件下容易发生材料分解、界面失效的问题，提升了钙钛矿电池的耐高温性能，使得钙钛矿电池满足空间高温环境下长期稳定工作的需求。

来源：国家专利局，国金证券研究所

3.2 东方日升：HJT 技术全球领先企业，空天场景打开 p 型特种产品市场空间

公司是全球领先的新能源企业，自 2022 年推出基于 210 技术平台+n 型异质结电池技术打造的伏曦组件以来，产品以高功率、高转换效率、超低碳足迹水平等特点持续引领市场潮流，伏曦 pro 系列产品引入光转技术、钢网印刷、高迁移靶材等技术，量产主流版型功率已突破 740W，对应电池转换效率达 26.61%。截至 2025 年 12 月，公司异质结产品出货已超过 10GW，覆盖全球 50 多个国家，展现了强大的市场竞争力和国际影响力。

公司异质结产品包括 n 型以及 p 型系列，其中 p 型超薄异质结系列产品为特种产品，在超薄电池应用（<70um）、生产成本、比功率、卷迭式卫星太阳翼适配（柔性）、抗辐射等方面具有综合比较优势，截至 2025 年，公司已有 3 年出货历史，累计出货已达数万片，客户分布于欧美地区。此外，公司已积极开展叠层电池技术的研发储备，经国家太阳能光伏产品质量检验检测中心认证，公司全球光伏研究院研发的钙钛矿/晶硅异质结叠层太阳能电池实现了 30.99% 的转化效率。



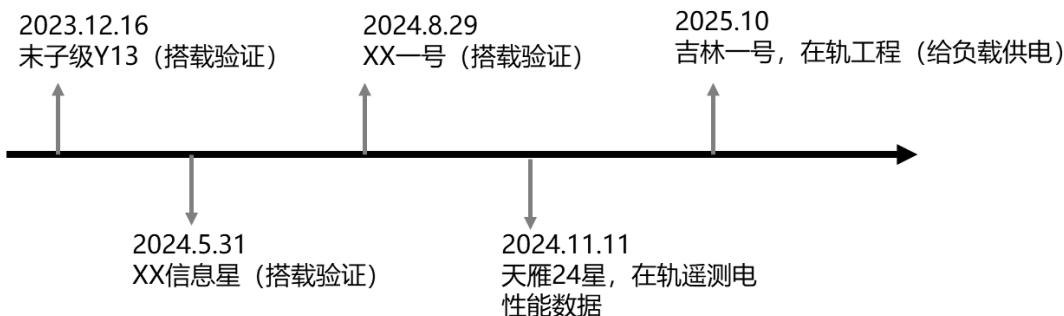
3.3 上海港湾：卡位卫星电源分系统，钙钛矿电池已进入在轨验证阶段

公司 2023 年成立子公司上海伏羲昕空，致力于为客户提供轻、廉、高效的太空能源系统解决方案及产品研发服务，技术团队汇聚航天院所、中科院及全球知名高校的行业精英，成员均具备 15 年以上航天工程实践经验，能够为卫星、探测器、无人机等各类空间飞行器提供高性能、低成本的能源系统保障。

截至 2025 年 6 月末，上海伏羲昕空已成功构建“研发创新-工程验证-成功交付”的良性发展闭环，其能源系统产品已累计保障 16 颗卫星顺利发射，40 余套卫星电源系统、太阳帆板及结构机构正持续在轨稳定运行；技术创新层面，累计已有 19 项能源系统相关核心专利获得受理或授权，技术壁垒持续夯实，核心产品关键性能指标均通过航天级严苛环境测试，技术可靠性在实践中不断得到验证。

公司深度参与长光卫星的“吉林一号”遥感卫星星座、时空道宇的吉利未来出行星座、西光航天的西光壹号遥感星座等多个重要卫星星座项目，客户覆盖二十余家卫星总体单位，2025 上半年公司订单量呈现快速增长态势，实现新签订单 3402 万元；此外公司积极布局钙钛矿太阳能电池的空间应用研发，以天雁 24 星遥测数据为例，公司钙钛矿太阳电池在轨稳定运行 9 个多月，对比入轨初期遥测数据，在同等光照条件下（约 52°~57°），钙钛矿太阳电池输出电压较为一致，约 2.8V~3.0V，输出电压几乎无衰减。

图表26：钙钛矿太阳能电池已通过多次在轨飞行任务验证其稳定性和可靠性。



来源：伏羲昕空公众号，国金证券研究所

3.4 迈为股份：HJT 整线设备头部供应商，提效降本重要推动力量

公司太阳能电池生产设备主要为 HJT 异质结高效电池生产线以及可用于多种电池工艺路径的全自动太阳能电池片丝网印刷线。HJT 设备方面，公司在原有丝网印刷设备的基础上，通过自主研发，陆续突破 HJT 电池核心工艺环节中的非晶硅薄膜沉积（PECVD 设备）、TCO 膜沉积（PVD 设备），并通过参股公司吸收引进日本 YAC 的制绒清洗技术，从而实现了 HJT 电池设备的整线供应能力。

2025 年公司推出 GW 级异质结电池制造整体解决方案（HJT4.0），单条产线理论年产能达 1.2GW，兼容 G12 半片规格，较上一代整线设备产品，占地面积节省 34%、现场人数降低 25%、设备用电量降低 20%、靶材消耗量降低 1.5mg/w、厂务二次配成本降低 20%，助力下游客户海外建厂优势更加明显。

此外，公司积极推进光子烧结、PED 和边缘刻蚀等 HJT 电池新技术导入，推动 HJT 组件功率向 775W 迈进；自主研发年产能 200MW 大尺寸（G12 半片）钙钛矿/异质结叠层电池整线设备，并于 2025 年 12 月成功取得首个商业化整线订单。

图表27：迈为 HJT 4.0 整线设备持续迭代

	HJT 3.0	HJT 4.0
单线产能	600MW	1.2GW
设备占地面积	baseline	-34%
现场人数	baseline	-25%
设备用电量	baseline	-20%
靶材消耗量	baseline	-1.5mg/W
厂务用电量（国内）	baseline	-40%
厂务二次配成本（国内）	baseline	-20%

来源：迈为股份公众号，国金证券研究所



3.5 捷佳伟创：光伏电池设备龙头，量产型设备积极推动钙钛矿产业化

公司是一家业内领先的太阳能电池设备研发、生产和销售的国家高新技术企业，致力于打造成技术平台型企业，全面布局 TOPCon、HJT、XBC、钙钛矿及钙钛矿叠层等高效、超高效光伏电池技术路线。

2023 年 11 月，公司新品发布会推出钙钛矿及叠层电池整线交钥匙方案，整线产品持续覆盖客户钙钛矿产业化进展全周期：1) 钙钛矿电池研发线，可兼容 450mm*650mm 及以下面积单结钙钛矿电池、210/182 整片的叠层钙钛矿电池。2) 百兆瓦钙钛矿薄膜电池量产线，两个主流规格，0.6m*1.2m 符合传统薄膜太阳能电池经典尺寸，1.2m*2.4m 满足晶硅电池统一尺寸（1134mm*2382mm）。3) 百兆瓦钙钛矿叠层电池量产线，210 半片规格下产能可以达到 2800 片/小时。

2025 年，公司在钙钛矿设备出货方面实现多点开花，推出工业级压电喷墨打印钙钛矿薄膜技术，并顺利出货喷墨打印设备；9 月出货 GW 级磁控溅射立式真空镀膜设备，可同时满足两片 1.2m×2.4m 基板生产。公司不断革新钙钛矿电池全路线全工序装备，并通过钙钛矿、HJT 中试线提供技术赋能，自主研发的钙钛矿电池工艺愈发成熟，无论是叠层还是单结路线，无论是两端还是四端结构，现阶段公司均可提供整线交钥匙工程。

图表28：捷佳伟创 2025 年内钙钛矿设备订单及出货情况多元覆盖大客户、整线、柔性化等需求

时间	设备进展
5 月 19 日	【中标】头部企业钙钛矿 PVD、RPD 设备订单
8 月 6 日	【出货】首台钙钛矿压电喷墨打印设备
8 月 7 日	【出货】日本客户钙钛矿整线设备
9 月 15 日	【出货】GW 级 PVD 设备
11 月 5 日	【中标】中石油 300mm×300mm 钙钛矿电池整线
12 月 22 日	【出货】首条商业化柔性钙钛矿产线核心设备

来源：捷佳伟创公众号，国金证券研究所

3.6 瑞华泰：打破 PI 薄膜国际垄断，航天级产品已应用于运载火箭与空间站

公司专业从事高性能 PI 薄膜的研发、生产和销售，主要产品系列包括热控 PI 薄膜、电子 PI 薄膜、电工 PI 薄膜等，二十年来坚持自主研发及创新，公司掌握了配方、工艺及装备等完整的高性能 PI 薄膜制备核心技术，已成为全球高性能 PI 薄膜产品种类最丰富的供应商之一，打破了杜邦等国外厂商对国内高性能 PI 薄膜行业的技术封锁与市场垄断，跨入全球竞争的行列。

公司的航天航空用 MAM 产品系依托自主研发的 PI 复合薄膜生产技术制成，具有良好的尺寸稳定性与高温密封性能，目前供应中国运载火箭技术研究院，应用于我国运载火箭，填补了国内空白，并且公司多次参与航天军工项目，包括载人空间站、运载火箭等；公司同时开展耐原子氧 PI 薄膜的研发，以应对低轨卫星及飞行器耐受原子氧冲击的能力，提升卫星及飞行器使用寿命，截至 2025 年中期，相关产品空间搭载评价反馈良好。

风险提示

商业航天产业发展不及预期：太空光伏电池片是卫星太阳翼的重要组成部分，若全球卫星星座建设因融资环境变化、关键技术突破迟滞或政策监管不确定性等因素放缓，将导致光伏产品需求规模不及预期。

电池技术迭代不及预期：新型电池技术的长期太空可靠性仍需充分验证，若其在强辐射、原子氧等极端环境下的衰减防护技术攻关不及预期，将导致产品无法满足主流星座的要求。



行业投资评级的说明：

买入：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 15%以上；

增持：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 5%—15%；

中性：预期未来 3—6 个月内该行业变动幅度相对大盘在 -5%—5%；

减持：预期未来 3—6 个月内该行业下跌幅度超过大盘在 5%以上。



特别声明：

国金证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

本报告版权归“国金证券股份有限公司”（以下简称“国金证券”）所有，未经事先书面授权，任何机构和个人均不得以任何方式对本报告的任何部分制作任何形式的复制、转发、转载、引用、修改、仿制、刊发，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。经过书面授权的引用、刊发，需注明出处为“国金证券股份有限公司”，且不得对本报告进行任何有悖原意的删节和修改。

本报告的产生基于国金证券及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，但国金证券及其研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。本报告反映撰写研究人员的不同设想、见解及分析方法，故本报告所载观点可能与其他类似研究报告的观点及市场实际情况不一致，国金证券不对使用本报告所包含的材料产生的任何直接或间接损失或与此有关的其他任何损失承担任何责任。且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，在不作事先通知的情况下，可能会随时调整，亦可因使用不同假设和标准、采用不同观点和分析方法而与国金证券其它业务部门、单位或附属机构在制作类似的其他材料时所给出的意见不同或者相反。

本报告仅为参考之用，在任何地区均不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告提及的任何证券或金融工具均可能含有重大的风险，可能不易变卖以及不适合所有投资者。本报告所提及的证券或金融工具的价格、价值及收益可能会受汇率影响而波动。过往的业绩并不能代表未来的表现。

客户应当考虑到国金证券存在可能影响本报告客观性的利益冲突，而不应视本报告为作出投资决策的唯一因素。证券研究报告是用于服务具备专业知识的投资者和投资顾问的专业产品，使用时必须经专业人士进行解读。国金证券建议获取报告人员应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。报告本身、报告中的信息或所表达意见也不构成投资、法律、会计或税务的最终操作建议，国金证券不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。

在法律允许的情况下，国金证券的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供多种金融服务。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布该研究报告的人员。国金证券并不因收件人收到本报告而视其为国金证券的客户。本报告对于收件人而言属高度机密，只有符合条件的收件人才能使用。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，国金证券股份有限公司客户中风险评级高于 C3 级（含 C3 级）的投资者使用；本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的建议或策略。对于本报告中提及的任何证券或金融工具，本报告的收件人须保持自身的独立判断。使用国金证券研究报告进行投资，遭受任何损失，国金证券不承担相关法律责任。

若国金证券以外的任何机构或个人发送本报告，则由该机构或个人为此发送行为承担全部责任。本报告不构成国金证券向发送本报告机构或个人的收件人提供投资建议，国金证券不为此承担任何责任。

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

上海	北京	深圳
电话：021-80234211	电话：010-85950438	电话：0755-86695353
邮箱：researchsh@gjzq.com.cn	邮箱：researchbj@gjzq.com.cn	邮箱：researchsz@gjzq.com.cn
邮编：201204	邮编：100005	邮编：518000
地址：上海浦东新区芳甸路 1088 号 紫竹国际大厦 5 楼	地址：北京市东城区建国内大街 26 号 新闻大厦 8 层南侧	地址：深圳市福田区金田路 2028 号皇岗商务中心 18 楼 1806



【小程序】
国金证券研究服务



【公众号】
国金证券研究