

高效太阳能电池及其阵列技术的空间应用研究进展

王 凯¹, 王训春¹, 钱 斌^{1,2}, 马聚沙¹, 陆剑峰¹

(1. 上海空间电源研究所, 上海 200245; 2. 上海航天技术研究院, 上海 201109)

摘 要: 太阳能电池阵可以将光能转换为电能, 是航天器能源系统的重要组成部分, 而利于光伏效应制成的太阳能电池是能源获取的重要载体。通过从硅电池到砷化镓电池、从单结到多结技术的应用发展, 结合晶格失配、多结生长、倒装结构及薄膜化等半导体相关制备技术分析各种空间太阳能电池的现状及应用前景。根据其基板结构及型式, 对体装式、刚性、半刚性、柔性及聚光太阳能电池阵的特点及未来发展方向进行了叙述, 为实现高效率、轻量化、高质量功率比的电池电路能源功能提供技术支持。

关键词: 太阳能电池; 三结砷化镓; 反向生长多结电池; 薄膜电池; 太阳能电池阵

中图分类号: V11 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)05-1436-11

网络出版时间: 2022-04-01



Recent Development on Space Application for High-Efficiency Solar Cells and Array Technology

WANG Kai¹, WANG Xunchun¹, QIAN Bin^{1,2}, MA Jusha¹, LU Jianfeng¹

(1. Shanghai Institute of Space Power Source, Shanghai 200245, China;

2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Solar arrays can convert light energy into electrical energy as an important component of spacecraft energy systems. And solar cells made of photovoltaic effect are an important carrier of energy acquisition. Through the development and application from Si solar cell to GaAs solar cell and from single junction to multi-junction technology, this review analyzed the current situation and bottlenecks of various space solar cells combined with the lattice mismatch, multi-node growth, flip-chip structure and thin film solar cell preparation technology. According to the structural composition and rigidity of the substrate, the characteristics and future development directions of body-mounted, rigid, semi-rigid, flexible and concentrator solar arrays were described to provide a technical support for the realization of high efficiency, light weight, high quality power ratio battery circuit energy function.

Keywords: solar cell; triple junction gallium arsenide; inverted metamorphic multi-junction cell; thin film solar cell; solar cell array

航天器电源系统是通过物理或者化学作用将太阳能、化学能、核能等转换为电能, 并采取存储、调节、变换等方式在寿命期间内为航天器提供稳定的能量来源^[1]。迄今为止, 全球发射的 95% 以上的航天器都采用太阳能电池阵组合蓄电池的方式作为电源系统的能源供给, 空间太阳能电池阵可将光能转换为电能为航天器供电和蓄电池充电, 因此维持太阳

电池阵的正常运行对航天器至关重要^[2]。

作为太阳能电池阵的基本光电转换单元, 空间太阳能电池经历了硅太阳能电池、叠层太阳能电池(单结和多结 GaAs、InP、InP/Si、CdTe 等电池)和薄膜太阳能电池的发展历程^[3]。光电转换效率是衡量太阳能电池性能的重要指标, 以目前使用最广泛的三结砷化镓太阳能电池为例, 其在轨光电转换效率已超过 30%, 但是

收稿日期: 2021-05-17。 修订日期: 2021-07-10。

基金项目: 上海市自然科学基金(20ZR1437300); 国家自然科学基金(U1937601); 国防基础科研项目(JCKY20203B019); 上海市浦江人才计划(2020PJD034)。

第一作者: 王 凯(1985—), 男, 硕士, 高级工程师。

通信作者: 钱 斌(1967—), 男, 硕士, 研究员。

Received date: 2021-05-17. Revised date: 2021-07-10.

First author: WANG Kai (1985—), male, Master, Senior Engineer.

E-mail: 348838131@qq.com

Correspondent author: QIAN Bin (1967—), male, Master, Professor.

E-mail: qianbin811@126.com

经过对常规的三结太阳电池优化后,其效率的提升主要是依靠更加新型的外延结构和多结电池生长技术,如通过反向生长的四结砷化镓太阳电池(IMM电池)的光电转换效率达到了35%^[4]。太阳电池阵是由若干太阳电池按照一定的串并联排布方式通过机械和电气方式组装,形成具有固定支撑结构的直流发电单元。自1958年在“先锋1号”卫星上首次采用太阳电池阵以来,空间太阳电池阵结构经历了从体装式、刚性展开式到柔性多维多模块展开式的发展历程,目前太阳电池阵朝着高输出功率、长工作寿命、高质量/面积比功率、低收拢体积的技术方向发展^[5-6],如AEC-Able公司研制的Ultraflex174型太阳电池阵^[7]采取类似伞状结构的阵面型式,其质量比功率超过了175 W/kg,收拢状态下的体积比功率超过了40 kW/m³;上海空间电源研究所分别为巴基斯坦PakTES-1A星(2018年)和新一代载人飞船试验船(2020年)研制的平均光电转换效率达32%和34%的太阳电池阵,为当今批量应用效率最高的太阳电池电路产品。

空间太阳电池的材料、转换效率,电池阵的基板构型都深刻的影响着太阳电池阵的综合性能^[8],而随着我国大容量通信卫星、新一代深空探测任务、空间站和微小卫星的快速发展,对空间电源技术提出了新的更高的要求。本文从空间太阳电池及其阵列技术的现状、发展方向、关键技术及存在问题进行全面阐述,为实现高效、轻量、高质量功率比的能源功能提供技术支持。

1 空间太阳电池技术的发展与展望

1.1 硅太阳电池

由于硅材料提纯、提拉法晶体生长、高温蒸汽扩散 P-N 结等工艺的成熟与进步, Bell 实验室于 1954 年研制了第 1 片平面结的单晶硅太阳电池,如图 1 所示,至此硅电池在地面和空间领域都得到了广泛的应用。在 20 世纪 80 年代以前航天器主要采用硅电池作为太阳电池阵的发电单元,它具有工艺成熟、生产成本低、机械强度高优点,通过扩散、密栅厚电极制备、正胶剥离等工艺技术改进,空间用硅太阳电池的光电转换效率从早期的 12.3%至提升到 15.0%以上^[9]。

2000 年以后,由于砷化镓电池的广泛应用,硅电池在空间的应用逐渐减少。但是,近年来随着地面通信技术(5G 通信)、商业航天等空间资源开发需求的增长,对低成本、批量化、快节奏的能源需求

也日益增加,由于具备产业化大规模生产的优势,硅电池依然具有广阔的应用前景。例如可通过在现有的 P 型衬底单晶硅太阳电池工艺基础上进行适当改进,进一步提升硅电池的光电转换效率和空间环境适应性,高效硅太阳电池制备过程的关键技术主要有:衬底减薄和镀膜优化工艺;质量比功率和抗空间辐照性能提升技术^[10]等。



图 1 高效硅太阳电池

Fig. 1 High-efficiency silicone solar cells

1.2 砷化镓太阳电池

1.2.1 单结砷化镓电池 在所有的 III-V 族化合物电池中,砷化镓(GaAs)电池的效率和耐辐射能力最高^[11-12],并且区别于硅材料,砷化镓的带隙宽度为 1.42 eV,与太阳光谱的匹配程度高,同时还可以通过改变掺杂比例和控制外延生长组分来调整太阳电池的禁带宽度^[13],单结砷化镓电池的光电效率可达 25% (AM 0, 即太阳辐照强度为太阳能常数),由于其具有耐高温、耐辐照性能好,光电转换效率高的优点,20 世纪 90 年代单结砷化镓电池开始取代硅电池作为航天器的基本发电单元。但是单结电池只对特定波段的光谱产生响应,而对于其余波段的光谱则不吸收或吸收效率很低,以致单结电池的光电转换效率受到局限^[14],因此可以将不同带隙的半导体材料制成的子电池采取串联方式连接成多结电池,通过增加其对太阳光谱的吸收范围,提高电池效率。

1.2.2 三结砷化镓电池 Jackson 于 1955 年首次提出可以借助于增加电池结数,采用更精细的光谱匹配的方法,实现通过多结电池技术高效地转换光谱能量,而随着金属有机化合物化学气相淀积(MOCVD)、隧穿结串联等技术的发展,三结砷化镓太阳电池于 21 世纪初已实现工程化量产和空间应用^[15-16]。

相比于单结电池,三结砷化镓电池具有光电转换效率高、空间环境适应性好、不同子电池层晶格

匹配性强等特点。如图 2 表示典型的 III–V 族三结砷化镓电池(GaInP/Ga(In)As/Ge)结构, 其制备工艺是先在衬底表面扩散锗结, 然后分别外延生长中、顶电池, 最后在其表面蒸镀防反射层介质膜^[17–18], 表 1 为国外三结砷化镓电池制造厂商的性能参数。

未来航天器将朝着大型、多功能、重型的方向发展, 因此需要继续提升太阳电池的质量比和面积比功率。但是在 GaInP/Ga(In)As/Ge 三结太阳电池中, 锗(Ge)电池带隙宽度为 0.66 eV, AM0 条件下, 其电流密度为三结电池电流密度的 1.5~2.0 倍^[19], 但是由于其串联方式和最小子电池电流(最小子电池层电流决定串联电池的输出电流)的影响, 并不是效率最优化的组合, 因此常规三结砷化镓太阳电池依然具有进一步优化和提升的空间, 如 Geisz 等^[20]和 King 等^[21]先后提出了晶格失配(MM)和倒装结构(IMM) 2 种太阳电池设计方案, MM 电池采取红移中、顶电池带隙, 减少底电池光谱吸收的方法, 优化不同子电池间的电流匹配度; IMM 电池是在 GaInP/Ga(In)As/Ge 结构基础上将 Ge 衬底替换为 InGaAs (带隙宽度为 1.0 eV), 提升了电池的效率^[22]。

近年来针对三结砷化镓电池发展的关键技术有:

1) 通过光学匹配优化, 基于晶格失配、带隙匹配的渐变带隙的多结砷化镓电池制造技术^[23], 进一步提高电池的转换效率;

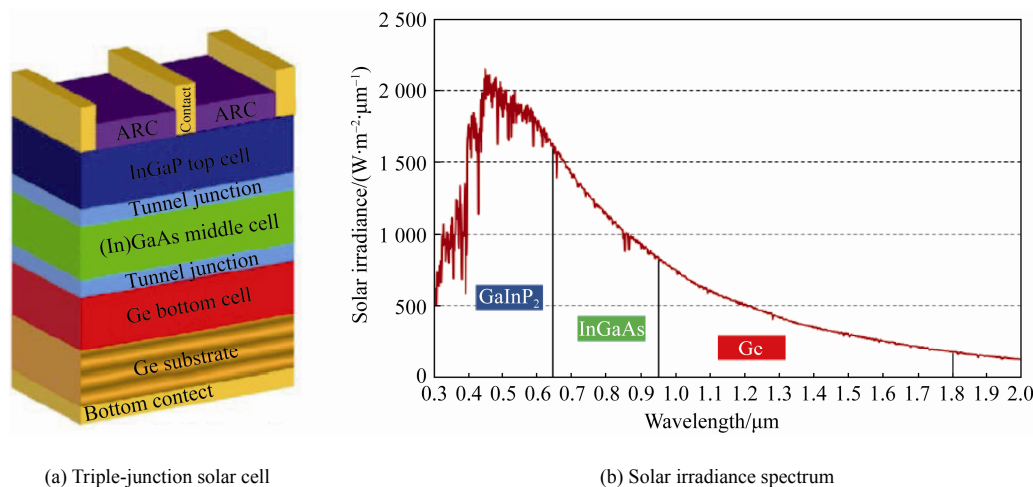
2) 分别通过底、中、顶电池的窗口层材料、晶格结构、场助收集效应和隧穿结的禁带材料^[24]的选择优化电池制备工艺;

3) 加强三结砷化镓电池的抗空间辐照环境的适应性及作用机理研究^[25]。

1.2.3 多结砷化镓电池

1) IMM四结电池

IMM 电池是一种基于晶格失配技术和反向生长工艺的新型电池(如图 3 所示), 它以砷化镓(InGaP)和砷化镓(GaAs)为原材料, 在衬底上依次反向生长顶、中、底电池, 然后经键合、剥离等工艺将外延生长层转移到另一衬底材料上, 通过中间层和底层结点变形(即晶格失配), 导致不均匀的原子间距提高太阳电池的转换效率^[21], 如 Emcore 公司报道其 IMM 四结电池的研究成果为: 在 AM0 条件下其光电转换效率为 34.8%^[26]。



(a) Triple-junction solar cell
ARC is anti-reflective coating.

(b) Solar irradiance spectrum

图 2 典型的三结砷化镓太阳电池结构及太阳辐射谱

Fig. 2 Illustration of a triple-junction GaAs solar cell and solar irradiance spectrum

表 1 目前三结砷化镓电池的制造厂商及相关参数

Table 1 Current productions triple-junction GaAs space solar cells

Manufacturer	Manufacturer's designation	Efficiency/%	Voltage at maximum power/V	Typical areal mass density/(mg·cm ⁻²)	Temperature coefficient at $P_{max}/(\% \cdot ^\circ \text{C}^{-1})$	Typical cell thickness/ μm	Solar absorptance
Azur space	3G30C	29.8	2.41	86	-0.23	150	0.91
SolAero	ZTJ	29.5	2.41	84	-0.22	140	0.92
Spectrolab	XTJ-prime	30.7	2.39	84	-0.22	140	0.88

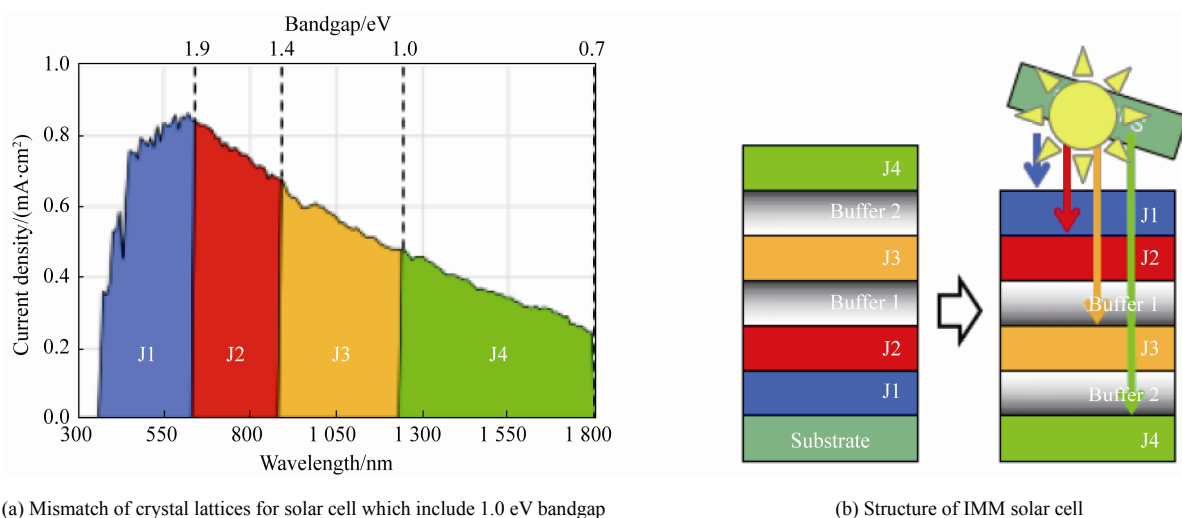


图 3 IMM 太阳电池

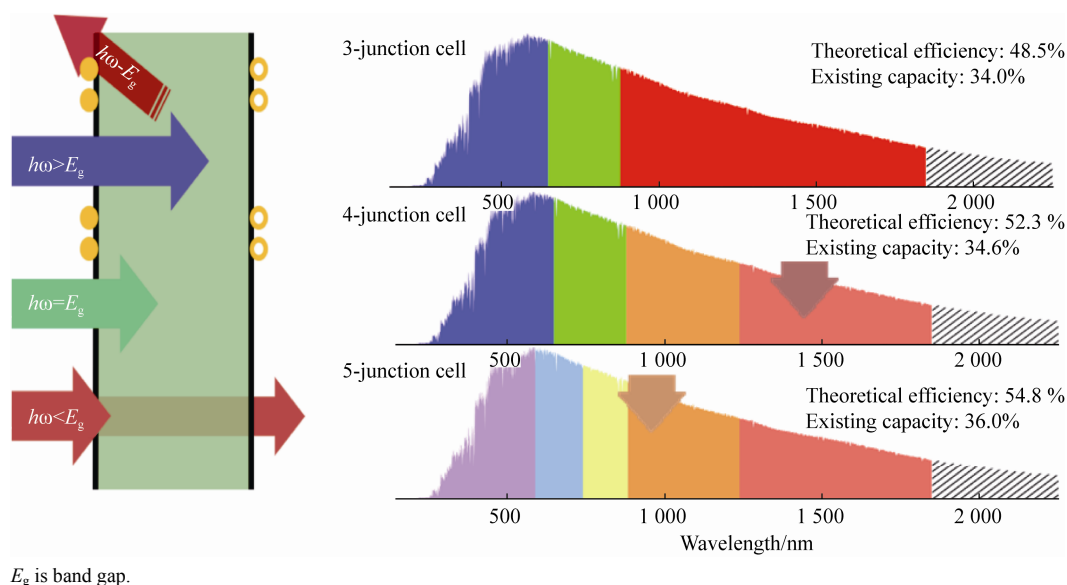
Fig. 3 Inverted metamorphic multi-junction (IMM) solar cells

IMM 电池技术与现有晶格匹配的三结电池技术相比是一个全新的技术体系,它集成了多项先进技术,如外延结构设计、渐变缓冲层的设计、衬底剥离转移等关键技术,但在其子电池结构层间存在较大的晶格失配,导致外延生长过程中电池内部的失配缺陷,因此需进一步开展保证产品质量与提高电池效率的协同研究。

2) 多结电池

增加电池结数,通过更精细的光谱匹配,是近期实现高效光电转换最现实可行的技术途径,由于 P-N 结太阳电池只能吸收能量大于其禁带宽度的光子,因此可以将不同半导体材料的 P-N 结按照禁带宽度自底向上递增的顺序叠加排列,使高能量的光子在上层宽禁带结吸收,低能量的光子在下层窄禁

带结吸收,通过选择性吸收不同区域波段的太阳光谱,有效提高太阳电池的转换效率。随着 MOCVD 技术,金属有机化合物原材料质量的提高,晶格匹配的 AlGaAs 材料、InGaP 材料、InGaAs 材料以及宽禁带高掺杂隧穿结的应用,未来空间太阳电池将向着多结技术发展(一般为 3~6 结电池结构,如图 4 所示),但 Long 等^[4]发现在顶电池 AlGaInP 生长过程带入了较高浓度的氧引发 Al—O 能级缺陷,从而导致倒装生长的 AlGaInP/AlGaAs/InGaAs/InGaAs 四结太阳电池短路电流密度降低,因此在实现最大理论效率要求的带隙匹配的前提下,同时保证太阳电池基本结构和功能材料的质量,成为制约太阳电池效率提升的主要因素^[27]。多结太阳电池的空间应用存在的主要技术困难有:



E_g is band gap.

图 4 多结太阳电池的光谱划分

Fig. 4 Spectral division of multi-junction solar cells

1) 由于具有抗空间辐射强的优点,多结太阳能电池通常生长在锗衬底上,但是其带隙宽度为 0.67 eV ^[28],低于各多结电池要求的底电池的最佳带隙宽度,影响了各多结电池最大理论转换效率的获取;

2) 在砷化物和磷化物材料体系中,获得带隙宽度 2.0 eV 以上的电池子结非常困难,MOCVD生长的含Al化合物由于载流子经由Al—O微结构的复合,缩短了少数载流子的扩散长度^[29],导致太阳能电池效率降低。

1.3 薄膜电池

由于具有良好的抗弯曲性能及较高的质量比功率,柔性薄膜电池(如图5所示)可用于大面积太阳能电池阵(MegaFlex电池阵)、太阳帆(IKAROS)等大型深空探测任务。目前柔性太阳能电池的种类主要有^[30]:晶体硅薄膜太阳能电池、非晶硅薄膜太阳能电池、

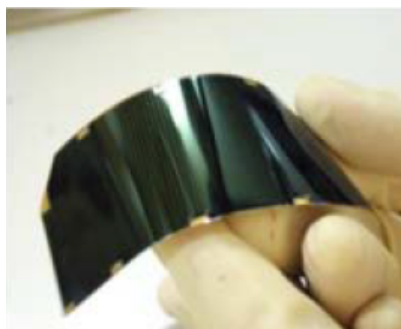


图5 薄膜砷化镓太阳能电池

Fig. 5 Flexible ultra-lightweight solar cells

铜铟镓硒薄膜太阳能电池^[31]、钙钛矿太阳能电池^[32–34]、CdTe薄膜太阳能电池等^[35],但是上述类型的薄膜电池均存在光电转换效率低的缺点^[36],无法满足载人、深空探测等大功率、大推力航天器对高效能源的应用需求^[37]。由于具有直接跃迁型材料属性,砷化镓吸收95%的太阳光只需要 $5\sim 10\mu\text{m}$ 的厚度,因此为满足航天器的日益增长的能源需求,将砷化镓材料制成超薄的柔性电池是一种可行的技术手段。

基于反向外延生长、外延层剥离、不同均质晶体材料间的键合技术的发展,相关学者和研究机构将这些工艺技术应用到柔性薄膜多结砷化镓太阳能电池的制备,Takamoto等^[38]将砷化镓外延层与金属衬底键合,再腐蚀剥离原有衬底,实现了电池薄膜化;Lee等^[39]制备了衬底可重复使用的单结柔性砷化镓电池的。薄膜砷化镓外延层^[40]已实现从刚性衬底到柔性衬底(高分子材料、金属、玻璃)的转移,且实现了较高的光电转换效率,柔性薄膜电池生产厂商及技术参见表2,但是其在制备过程中还需突破的关键技术有:

1) 基于晶格失配材料的反向外延生长控制技术:由于晶格常数不同造成的失配应力导致外延片形变和碎裂,因此亟需开展基于晶格失配材料的外延生长工艺研究,提升产品的合格率。

2) 高可靠性键合技术:通过原子级别的结合(共价键和van der Waals力),突破材料晶体结构限制,实现异质集成,如开展外延层和柔性薄膜衬底的直接键合技术研究。

表2 高效柔性薄膜太阳能电池技术

Table 2 High-efficiency flexible thin-film solar cell technology

Manufacturer	Technical route	Key technology	Technique level
Emcore	Reverse-epitaxial for 4-junction, polyimide substrates	Substrate lift-off for large area, efficiency loss 0.8%	Efficiency 33.6%; Mass specific power 2 900 W/kg
Sharp	Reverse-epitaxial for 4-junction, polyimide substrates	Substrate lift-off for large area, efficiency loss 0.8%	Efficiency 30.5%; Mass specific power 2 700 W/kg

1.4 太阳能电池技术展望

由于对能源需求的不断加大,未来太阳能电池会继续向更高的质量比功率和面积比功率发展,因此需进一步提升太阳能电池的转换效率和发展轻质化的柔性薄膜太阳能电池技术,关键技术有:

1) 晶格失配 基于晶格匹配设计理念的太阳能电池的效率已经接近理论极限,近年来,开始出现“带隙匹配”设计理念,通过优化InGaP和InGaAs子电池带隙在AM0太阳光谱中的分布,以期获得更高的效率。但是由于诸如高缺陷密度(位错和层错)、表

面粗糙度较大以及外延片翘曲等问题,导致太阳能电池的性能显著恶化,需开展基于逐层晶格弛豫设计减少失配导致缺陷的研究^[41]。

2) 多结生长 三到六结太阳能电池的效率可以达到38.8% (三结)、41.8% (四结)、43.9% (五结)和45.3% (六结),增加多结电池的P-N结数量仍是近期实现高效光电转换的最现实可行的技术途径。需借助计算机辅助手段深入分析不同空间辐照效应对多结太阳能电池载流子运输影响,在实现最大理论效率要求的带隙匹配的同时,保证太阳能电池基本结构和

功能的材料质量。

3) 倒装结构 晶格失配材料被结合进传统的正向生长结构时, 由于晶格失配的底电池先生长, 导致其上的中间电池和顶电池都受到失配和缺陷的影响, 进而影响器件性能。但采用倒装结构和反向生长技术, 先完成与衬底晶格匹配的顶、中电池的外延生长, 再生依次是渐变缓冲层和底电池, 以此提高整个太阳电池的综合性能。

4) 电池薄膜化 通过提高多层膜系外延材料生长质量及其与太阳光谱的匹配度, 加强产生光子的有源层与柔性衬底的热匹配性, 进一步提升电池质量及光电转换效率。

2 空间太阳电池阵技术的发展与展望

随着航天技术的发展, 太阳电池阵的结构型式也经历了从体装式到展开式, 基板从刚性到柔性化的转变和发展(如图 6 所示)。

2.1 体装式太阳电池阵

体装式太阳电池阵(如图 7 所示)是将太阳电池铺设在卫星表面, 具有结构简单、无需专门驱动机

构的特点, 但是受限于光照条件和太阳电池铺设面积, 体装式太阳电池阵的功率扩展受到限制, 只适用于输出功率较低(低于 2 kW)的应用需求。

2.2 刚性太阳电池阵

太阳桨以基板与卫星本体连接, 是展开式太阳电池阵的最初形式, 并应用于 1958 年 8 月发射的 Explorer-VI 卫星, 随着对太阳电池阵输出功率需求的增大, 刚性太阳电池阵(如图 8 所示)成为航天器主流应用的太阳电池阵构型, 它在发射阶段以折叠的方式收拢, 入轨后展开, 其质量比功率可达约 80 W/kg, 面密度可达约 300 W/m²。刚性太阳电池阵具有可对日定向、可实现功率扩展、结构简单、刚度较大的优点, 但也存在质量和收拢后体积大、姿态控制难度大、功率传输环节多的缺点。目前刚性太阳电池阵的发展方向主要有: 大面积太阳电池阵技术($\geq 60 \text{ m}^2$)、刚性基板轻量化技术^[42]、高温/高压太阳电池阵技术、深空探测环境下太阳电池阵的适应性技术等。例如深空探测任务(包含火星、木星等), 涉及超低温、超低太阳辐照度、特殊光谱、超高辐射等空间环境, 应根据任务需求及环境特点, 对太阳电池阵

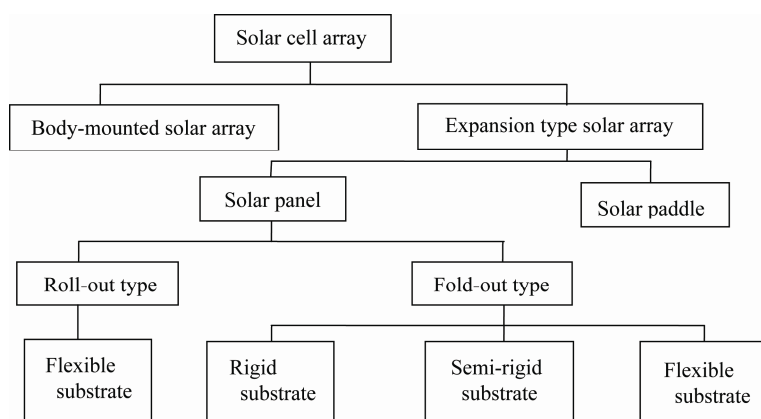
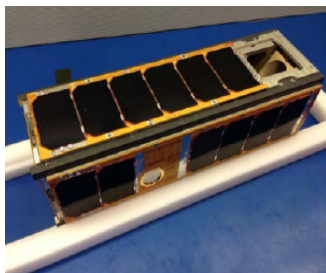


图 6 太阳电池阵列构型划分

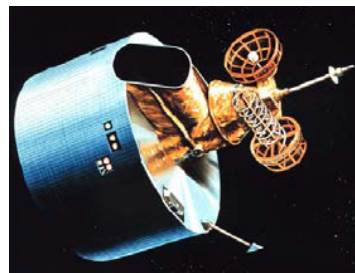
Fig. 6 Structure classification of solar cell arrays



(a) GOES 7



(b) CP8 IPEX



(c) RACE

图 7 体装式太阳电池阵

Fig. 7 Body-mounted solar arrays

进行针对性设计分析。以火星探测为例,火星表面尘埃通过van der Waals力和静电作用会沉积在太阳能电池表面的玻璃盖片上,改变了玻璃盖片表面电位分布,加剧了静电放电的可能性,并且由于尘埃的遮挡使太阳能电池的电性能下降约22%~89%和导致电池温度升高^[43]。因此对于进行火星着陆的太阳能电池阵的关键技术有:通过适当的降低顶电池和中电池的材料带隙,保证顶电池和中电池的电流平衡^[44],提高太阳能电池光谱匹配度和电池整体电流的输出能力;通过自然除尘、振动除尘、电帘除尘、莲叶效应除尘等方式开展太阳能电池阵表面的自清洁技术研究^[45]。

2.3 半刚性太阳能电池阵

半刚性基板主要由碳纤维增强复合材料框架、玻璃纤维编织网、铰链支座等组成,按照基板构型可分为绷弦式和网面式结构,参见图9。由于半刚性电池模块的正背面都直接暴露于空间环境,因此需采用双面抗辐照玻璃盖片将其封装在内,然后按照一定的串并联设计,形成电池电路。由于半刚性电池阵独特的基板及电池模块设计能有效降低原子

氧、等离子体导致的静电放电以及温度交变等造成的损伤,对于低地球轨道的空间环境适应性比刚性电池阵要好^[46]。此外由于散热较好,光照时较刚性电池阵工作温度降低十多度,能有效提升功率输出,并且当处于LEO轨道时,还可利用地球的反反光,实现阵列正背面的双面发电,平均功率约提高10%。俄罗斯“和平号”空间站、中国天宫飞行器的能源功能都采用半刚性电池阵结构。半刚性太阳能电池阵的关键技术有:半刚性电池模块的力学承载设计、大面积电池封装技术,大面积电池阵装配、展开收拢及地面环境测试技术等^[47]。

2.4 柔性太阳能电池阵

目前,对于空间站、月球基地等高达数万瓦的超大功率以及太阳能-电力推进和更高比功率(150~200 W/kg)的航天飞行任务的应用需求,受限于航天器质量、整流罩规格的限制,现有的刚性太阳能电池阵难以满足超大功率、高质量比功率的供电能源功能需求,因此空间太阳能电池阵的总体构型朝着柔性多模块多维展开方向发展,柔性太阳能电池阵采用的是柔性基板,相对于传统的刚性、半刚性太

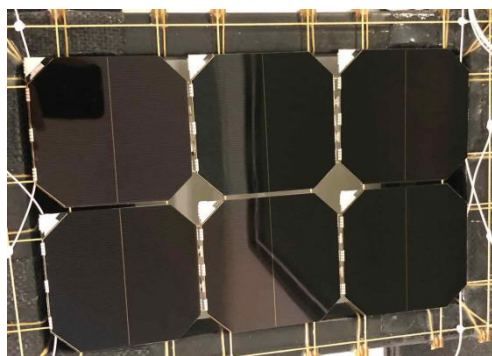


(a) Solar probe plus

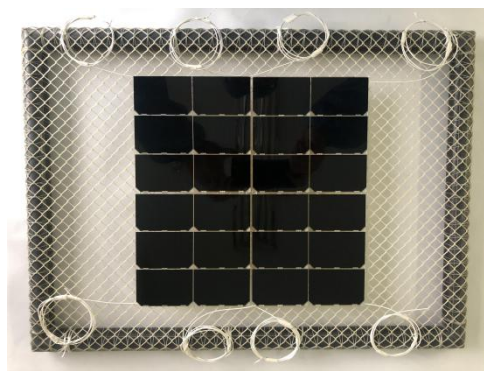


(b) Dawn spacecraft with 36 m² array

图8 刚性太阳能电池阵
Fig. 8 Deployable rigid solar arrays



(a) String structure



(b) Mesh structure

图9 半刚性太阳能电池阵
Fig. 9 Semi-rigid solar array

阳翼具有收拢包络小、重量轻、比功率高等优点,是未来超大功率航天器的发展趋势。按照展开方式,柔性太阳能电池阵可分为折叠式、扇形式和卷绕式。

折叠式柔性电池阵的基板以“Z”型方式折叠收拢,太阳能电池阵采用刚性电池和聚酰亚胺薄膜基板结构,到达预定轨道后展开,其中最著名的应用是国际空间站(ISS)太阳能电池阵系统(图10a),包含4对8个翼展,单翼展宽超70 m,整阵面积超2 400 m²,发电功率约为75~90 kW。洛克希德马丁公司在A2100平台^[48]也采用了折叠式柔性太阳能电池阵,相比刚性结构能多提供了50%以上的电力(最大功率达20 kW),而质量减少30%,我国的空间站也采用了折叠式电池阵结构。折叠式柔性太阳阵适用于功率输出较大的航天器的能源需求,由于可以以整翼为单元进行展开收拢,因此可以采用刚性电池和柔性基板的组合方式,其空间展收技术相对成熟,可靠性较高。

扇形太阳能电池阵:20世纪90年代,美国ATK公司研发一种圆形柔性薄膜太阳翼UltraFlex,该机构无伸展机构和驱动电机,具有收拢体积较小,展开可靠性高的特点。2008年发射的凤凰号火星着陆器,其质量比功率达到103 W/kg;2004~2009年研制的ST8太阳翼直径达5.5 m,其质量比功率达175 W/kg^[49-50],并且在此基础上,又减小收拢长度,在展开半径1/3处折叠,成功研制出直径12 m的新一

代扇形展开翼^[51](MegaFlex柔性翼参见图10b,其直径可最大扩展到30 m,输出功率达300 kW)。圆形阵面型式的MegaFlex电池阵可以减少污染和粒子溅射,电池翼展开刚度低、长度短、具有可重复展收和扩展性好和转动惯量低等优点,但是缺点是相比折叠式电池阵其输出功率相对较低,不能适用于载人空间站等能源功能较大的任务需求及多维模块的展开方式。

卷绕式太阳能电池阵(ROSA 技术,如图10c所示)是将太阳能电池板通过卷绕方式收纳,到达预定轨道后再展开,其较早的应用是1973年发射的FRUSA航天器和1990年发射的Hubble望远镜。2017年7月,Spectrolab公司将尺寸约为19 m×6 m,输出功率为120 kW的卷绕式太阳能电池阵应用于国际空间站,并致力于发展旨在满足未来应用的功率超100 kW超大电池翼技术。卷绕式电池阵展开机构面积较小,有效减少太阳翼整体抗力学需求,具有较高的质量比功率和面积比功率,但是对太阳电池电路的抗弯曲形变、封装性能以及展开过程的刚度控制都有较高要求。

各种不同构型空间太阳能电池阵的相关参数参见表3,基于对空间太阳能电池阵的技术现状分析得出:体装式电池阵结构简单不需要基板和驱动机构,但受限功率,只能应用在微小卫星上;刚性电池阵是目前航天器的主流选择,但存在质量重和收拢体

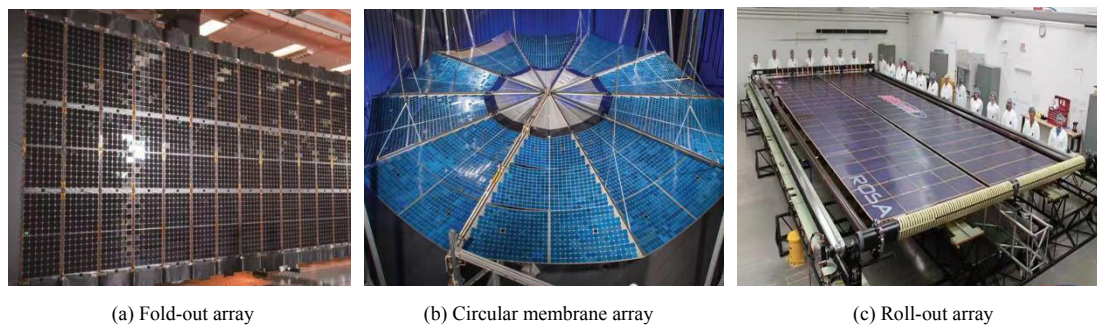


图 10 柔性太阳能电池阵

Fig. 10 Flexible solar arrays

表 3 目前太阳能电池阵的相关参数

Table 3 Overview of current solar array state-of-practice

Structure	Max power (1AU)/kW	Specific power (1AU, BOL)/ (W·kg ⁻¹)	Power density (1AU, BOL)/ (W·m ⁻²)	Substrate area density/ (kg·m ⁻²)
Body mounted solar array	2		260	
Rigid solar array	25~80	50~80	280~300	1.00~1.30
Semi-rigid solar array	28~100	50~80	280~300	0.80~1.24
Fold-out flexible solar array	40~100	150	280~300	0.80
Circular membrane flexible solar array	300	200	280~300	
Roll-out flexible solar array	100	175	280~300	0.80~1.00

BOL: Beginning of life.

积大的缺点；柔性电池阵质量轻、收拢体积小，更能适应轻质、大功率能源功能的应用需求，但其展开机构较为复杂。

2.5 聚光太阳电池阵

目前，空间太阳电池阵的能量获取以直接接受太阳光谱辐射为主，但是空间用硅电池的光电转换效率约为16%，三结砷化镓太阳电池的光电转换效率为26%~32%，受限于基础材料科学及材料工程制备水平，短时期内提高太阳电池的光电转换效率难度较大。因此通过聚光器汇集太阳辐照形成“焦斑”或“焦带”，经太阳电池获得电能输出，可以有效提升空间太阳能的利用率^[52]，首次采用聚光太阳电池阵是NASA于1998年10月发射的“深空一号”，面积比功率较非聚光太阳电池阵高50%。按聚光方式，聚光太阳电池阵分为点聚焦式和线聚焦式，其中线聚焦式收集光照面积大，适用于空间电池阵系统；按照聚光原理，则可以分为反射式和折射式，目前空间应用的聚光太阳电池阵主要有2种类型：V形槽反射式结构(如Cell Saver反射聚光电池阵，其面密度和比功率分别为176 W/m²和61 W/kg，如图11a所示)和菲涅耳透镜^[53]折射式结构(如Stretched Lens折射聚光阵，其面密度和比功率分别为300 W/m²和183 W/kg，如图11b所示；可收卷式SOLAROSA柔性菲涅耳聚光透镜型聚光电池阵^[54]，如图11c所示)。

由于反射式聚光器的面型偏差导致太阳电池组件的辐照度不均匀，造成输出电流偏小；而采用对称折射式Fresnel聚光透镜结构的面型偏差容限较大，并且由于透镜的保护，降低了太阳电池遭受空间碎片、原子氧等的侵蚀和静电放电的风险，因此从光电转换效率及空间环境适应性角度分析比较，具有较高聚光比的折射式聚光阵比反射式聚光阵有优势。因此近年来美国、俄罗斯等国都把线聚焦Fresnel透镜聚光阵技术作为发展的重点，其关键技术有：聚光透镜表面多层防护膜系结构设计、防护薄膜镀制、聚光器结构设计、高密度热流热控设计等。

2.6 太阳电池阵可靠性技术展望

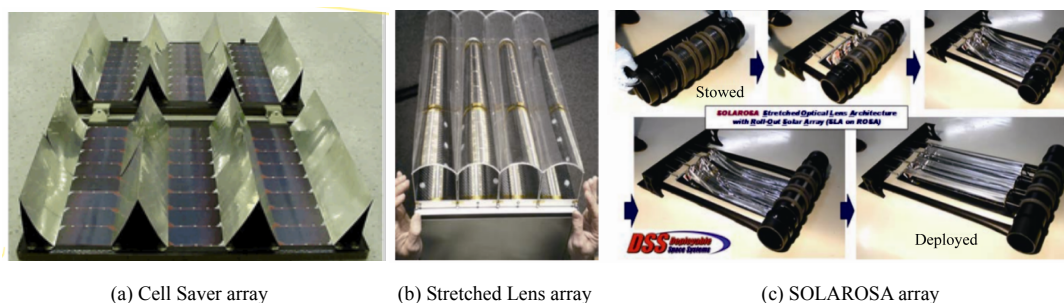
据数据统计，电源分系统故障在航天器故障中占比约27%，而源于太阳电池阵的故障和失效又占电源分系统的42%。主要的故障和失效型式如：低轨高温交变下材料的热疲劳、热老化效应诱发的故障，原子氧对材料的剥蚀效应；高轨带电粒子辐射对太阳电池阵电性能输出影响；等离子体对高压太阳电池阵的电流泄漏和弧光放电损伤。因此需针对太阳电池阵的结构和在轨空间环境特点对太阳电池阵开展进一步的设计和优化，主要措施有：

1) 根据太阳电池阵的失效模式，基于电池阵的多层结构以及多因素空间环境下的耦合作用，研究多层复杂结构的裂纹扩展机理以及动力学演化规律，建立复杂空间环境下长寿命太阳电池阵的失效演化与抑制机制。

2) 根据太阳电池阵的产品特性，开展不同故障模式下的仿真试验和环境可靠性试验，建立太阳电池阵各组成产品失效模型和寿命评价机制，并形成加速试验方法，开展故障的预测、诊断和修复以及对健康状况的评估。

3) 根据相关规范和标准，对太阳电池电路产品及元器件进行安全裕度设计，并且加强太阳电池阵的在轨监测和飞行搭载试验，获得诸如静电放电时间、位置区域、放电概率等关键参数，提高太阳电池电路产品的可靠性。

4) 根据太阳电池阵的轨道环境特点及任务类型，开展对太阳电池阵材料与器件的选型和设计，如对于地内行星探测任务应选择耐高温的材料，并做好热控和空间防护措施；对于地外行星探测任务应进行与目标行星光谱相匹配的太阳电池设计，并发展轻质、高效太阳电池阵技术；而针对频繁进出地影而导致高温交变次数增加的低地球轨道，在太阳电池阵的关键连接(胶接、焊接)环节，要选择对热老化和热疲劳效应耐受性好、以及与基底材料热膨胀系数匹配性高的材料。



(a) Cell Saver array

(b) Stretched Lens array

(c) SOLAROSA array

图 11 聚光太阳电池阵

Fig. 11 Concentrator solar arrays

3 结语

随着基础科学、基础材料、先进工艺技术的快速发展与不断加强, 空间航天器的能量获取呈现高效率、轻量化、高质量功率比的发展趋势, 通过材料科学、凝聚态物理和先进半导体器件工艺等交叉学科的发展, 不断持续提升太阳能电池的光电转换效率、质量比功率。能量获取专业方向将重点发展高效多结太阳能电池技术、柔性薄膜太阳能电池及柔性太阳能电池阵技术, 以满足未来“高效率、轻量化、更高质量比功率”的要求。具体的措施有:

1) 借助先进半导体工艺发展四结以上结构的 III-V 族太阳能电池, 提升太阳能电池效率;

2) 借助外延层转移技术发展柔性薄膜太阳能电池, 大幅降低高效电池的衬底厚度和重量, 实现柔性轻量化;

3) 采用柔性、耐空间环境的材料和结构等开展柔性化、轻量化的高效太阳能电池阵列技术研究, 进一步提升质量比功率;

4) 进一步发展柔性多维展开式的太阳能电池阵技术, 以适应航天器对超大功率、低成本和轻质能源功能的需求。

参考文献:

- [1] ZHANG J, YUAN L M, CHEN S L, et al. A survey on design of reaction spheres and associated speed and orientation measurement technologies[J]. ISA Trans, 2020, 99(4): 417–431.
- [2] JIN S, ZHANG D, FANG Z. High-linearized and fast-convergent Rml look-up table control method for space solar array simulator[J]. CPSS Trans Power Electron Appl, 2020, 5(3): 289–301.
- [3] BARDE H. 1989–2019: Three decades of power systems evolution through the prism of ESPC[C]//Proceedings of European Space Power Conference, France, 2019: 1122–1125.
- [4] LONG J H, WU D Y, LU S L, et al. Failure analysis of thin film four-junction inverted metamorphic solar cells[J]. Prog Photovolt Res Appl, 2021, 29(2): 181–187.
- [5] JEREMY B, STEVE K, MATT L, et al. On-orbit validation of the roll-out solar array[C]//IEEE Aerospace Conference, Montana, USA, 2018: 105–109.
- [6] LAN X, LIU L W, ZHANG F H, et al. World's first spaceflight on-orbit demonstration of a flexible solar array system based on shape memory polymer composites[J]. Sci China Technol Sc, 2020, 63(8): 1436–1451.
- [7] HOANG B, WHITE S, SPENCE B, et al. Commercialization of deployable space systems's roll-out solar array (ROSA) technology for space systems loral (SSL) solar arrays[C]//IEEE Aerospace Conference, Montana, USA, 2016: 129–141.
- [8] SURAMPUDI R, BLOSIU J, STELLA P, et al. Solar power technologies for future planetary science missions[R]. NASA/TM101316, Pasadena, NASA, 2017: 29.
- [9] BAILEY S, RAFFAELLE R. Space solar cells and arrays[C]//LUQUE A, HEGEDUS S eds. Handbook of Photovolt Science and Engineering. John Wiley & Sons, Inc, 2011: 365–401.
- [10] YANG Y, FENG S, LI M, et al. Structure, optical absorption, and performance of organic solar cells improved by gold nanoparticles in buffer layers[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2015, 7(44): 24430–24437.
- [11] IMAIZUMI M, NAKAMURA T, TAKAMOTO T, et al. Radiation degradation characteristics of component subcells in inverted metamorphic triple-junction solar cells irradiated with electrons and protons[J]. Prog Photovolt Res Appl, 2017, 25: 161–174.
- [12] TSENG M, HORNG R, TSAI Y, et al. Fabrication and characterization of GaAs solar cells on copper substrates[J]. IEEE Electron Dev Lett, 2009, 30(9): 940–942.
- [13] YAMAGUCHI M, TAKAMOTO T, ARAKI K, et al. Multi-junction III-V solar cells: Current status and future potential[J]. Sol Energy, 2005, 79(3): 78–85.
- [14] LEE K, ZIMMERMAN J D, XIAO X, et al. Reuse of GaAs substrates for epitaxial life-off by employing protection layers[J]. J Appl Phys, 2012, 111(3): 33–52.
- [15] HENRY W, JULIE A. Space solar array reliability: A study and recommendations[J]. Acta Astronaut, 2008, 63(11): 1233–1238.
- [16] KOVAL N E, DA P F, ARTACHO E. Ab initio electronic stopping power for protons in $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaAs}/\text{Ge}$ triple-junction solar cells for space applications[J]. Royal Soc Open Sci, 2020, 11(7): 200925.
- [17] PETER C, BRANDON H, SALAH B. Tunnel junctions for III-V multijunction solar cells review[J]. Crystals, 2018, 12(8): 445–460.
- [18] 孙希鹏, 肖志斌, 杜永超. 新型砷化镓太阳能电池的宽带减反射膜设计[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 471–479.
SUN Xipeng, XIAO Zhibin, DU Yongchao. Acta Opt Sin (in Chinese), 2016, 36(4): 471–479.
- [19] BAUHUIS G J, MULDER P, SCHERMER J J. Ultra-thin, high performance tunnel junctions for III-V multijunction cells[J]. Prog Photovolt Res Appl, 2014, 22: 656–660.
- [20] GEISZ J F, KURTZ S, WANLASS M W, et al. High-efficiency GaInP/GaAs/InGaAs triple-junction solar cells grown inverted with a metamorphic bottom junction[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(36): 23–52.
- [21] KING R, BOISVRT J, REHDER E, et al. High efficiency inverted metamorphic (IMM) solar cells[C]//IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference, Florida, USA, 2013: 791–815.
- [22] SAMBERG J P, ZACHARY C C, BRADSHAW G K, et al. Effect of GaAs interfacial layer on the performance of high bandgap tunnel junctions for multijunction solar cells[J]. Appl Phys Lett, 2013, 103(10): 103503.
- [23] 陆宏波, 李戈, 李欣益, 等. 晶格小失配 InGaAsP 材料特性及太阳能电池应用[J]. 发光学报, 2020, 41(4): 351–356.
LU Hongbo, LI Ge, LI Xinyi, et al. Chin J Lumin (in Chinese), 2020, 41(4): 351–356.
- [24] BEDAIR S M, HARMON J L, CARLIN C Z, et al. High performance as-grown and annealed high band gap tunnel junctions: Te behavior at the interface[J]. Appl Phys Lett, 2016, 108(20): 203903.
- [25] LACKNER D, SCHON J, LANG R, et al. Radiation hard four-junction space solar cell based on GaInAsP alloys[C]//European Space Power Conference, Juan-les-pins, France, 2019: 1122–1125.
- [26] WOJTCZUK S, CHIU P, ZHANG X, et al. InGaP/GaAs/InGaAs 41% concentrator cells using bi-facial epigrowth[C]//35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, USA, 2010:

- 1259–1264.
- [27] TAKAMOTO T, KANEIWA M, IMAIZUM M, et al. InGaP/GaAs-based multijunction solar cells[J]. *Prog Photovolt*, 2005, 13(6): 495–511.
- [28] GEISZ J F, STEINER M A, JAIN N, et al. Building a six-junction inverted metamorphic concentrator solar cell[J]. *IEEE J Photovolt*, 2018, 8(2): 626–632.
- [29] AEBERHARD U. Theoretical investigation of direct and phonon-assisted tunneling currents in InAlGaAs/InGaAs bulk and quantum-well interband tunnel junctions for multijunction solar cells[J]. *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*, 2013, 87(8): 081302.
- [30] BAUHUIS G J, MULDER P, SCHERMER J J. Ultra-thin, high performance tunnel junctions for III–V multijunction cells Prog[J]. *Prog Photovolt*, 2012, 22(6): 656–660.
- [31] GALL S N, BARREAU S, KESSLER J, et al. Material analysis of PVD-grown indium sulphide buffer layers for Cu(In, Ga)Se₂-based solar cells[J]. *Thin Solid Films*, 2005, 480: 138–141.
- [32] 肖立新, 邹德春. 钙钛矿太阳能电池[M]. 北京: 北京大学出版社, 2016: 155–180.
- [33] 王爱丽, 汪舒蓉, 林红, 等. 钙钛矿太阳能电池的研究进展与关键挑战[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(7): 1306–1322.
- WANG Aili, WANG Shurong, LIN Hong, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(7): 1306–1322.
- [34] TU Y G, XU G N, YANG X Y, et al. Mixed-cation perovskite solar cells in space[J]. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62(7): 974221.
- [35] SITES J, GLOECKLER M. Apparent quantum efficiency effects in CdTe solar cells[J]. *J Appl Phys*, 2004, 95(8): 4438–4445.
- [36] MIYAZAWA Y, IKEGAMI M, CHEN H W, et al. Tolerance of perovskite solar cell to high-energy particle irradiations in space environment[J]. *Iscience*, 2018, 2: 148–155.
- [37] KATSUAKI T, KATSUYUKI W, YASUHIKO A, et al. Flexible thin-film InAs/GaAs quantum dot solar cells[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 100(25): 192–202.
- [38] TAKAMOTO T, KANEIWA M, IMAIZUMI M, et al. InGaP/GaAs-based multijunction solar cells[J]. *Progr Photovolt Res Appl*, 2005, 13(6): 495–511.
- [39] LEE K, ZIMMERMAN J D, XIAO X, et al. Reuse of GaAs substrates for epitaxial life-off by employing protection layers[J]. *J Appl Phys*, 2012, 111(3): 33–52.
- [40] 薛超. 柔性薄膜砷化镓太阳能电池技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- XUE Chao. Research of flexible thin film GaAs solar cell technology (in Chinese, dissertation). Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [41] SASAKI K, AGUI T, NAKAIDO K, et al. Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells[J]. *AIP Conf Proc*, 2013, 1556(22): 22–25.
- [42] SUN K W, ZHU M, LIU Q. Membrane material-based rigid solar array design and thermal simulation for stratospheric airships[J]. *Adv Mater Sci Eng*, 2014(6): 1–7.
- [43] PHILIPPE R. Survey of aerodynamics and aerothermodynamics effects carried out in the frame of mars exploration projects[J]. *Prog Aerosp Sci*, 2014(70): 1–27.
- [44] EDMONDSON K, JOSLIN D, FETZER C, et al. Simulation of Mars surface solar spectrum of optimized performance of triple-junction solar cells[R]. NASA/CP-214494, California: NASA, 2007: 12.
- [45] CALLE C I, MANTOVANI J G, BUHLER C R, et al. Embedded electro-static sensors for Mars exploration missions[J]. *J Electrostat*, 2004, 61(3): 245–257.
- [46] O'NEILL M J, HOWELL J, LOLLAR L, et al. Stretched lens array squarerigger (SLASR): A unique high-power solar for exploration missions[J]. *Acta Astronaut*, 2006, 59(1–5): 157–165.
- [47] TIBERT G. Deployable tensegrity structures for space applications[R]. Stockholm, Royal Institute of Technology, 2002: 179–201.
- [48] PUIG L, BARTON A, RANDO N, et al. A review on large deployable structures for astrophysics missions[J]. *Acta Astronaut*, 2010, 67(1): 12–26.
- [49] TRAUT T A, WHILE S T. ST8 UltraFlex-175 solar array deployed dynamics analytical modeling and comparison to validation criteria[R]. AIAA 2010–1498. Washington D C: AIAA, 2010: 28.
- [50] DWAYNE L E, STEVE W. ST8 validation experiment: Ultraflex-175 solar array technology advance: Deployment kinematics and deployed dynamics ground testing and model validation[R]. AIAA 2010–1497. Washington D.C: AIAA, 2010: 37.
- [51] SPENCE B, WHITE S, WILDER N, et al. Next generation UltraFlex solar array for NASA's new millenium program Space Technology[C]//IEEE Aerospace Conference, Montana, USA, 2005: 149–162.
- [52] ARAKI K, HERRERO R, ANTON I, et al. Why are acceptance angle of Pm and Isc different in spite of uniform illumination onto concentrator solar cells[C]//44th Photovoltaic Specialist Conference, Washington D.C, NASA, 2017: 105–109.
- [53] 付蕊, 陈诺夫, 刘虎. 用于多结太阳能电池的均匀聚光菲涅耳透镜的设计与分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 471–479.
- FU Rui, CHEN Nuofu, LIU Hu. *Acta Opt Sin (in Chinese)*, 2016, 36(12): 471–479.
- [54] 邵立民, 杨淑利. 空间太阳能电池聚光系统设计及性能分析研究[J]. *西北工业大学学报*, 2018, 36(3): 471–479.
- SHAO Liming, YANG Shuli. *J Northwestern Polytechn Univ (in Chinese)*, 2018, 36(3): 471–479.