

激光输能光电转换增效方法研究现状

李贝贝¹, 李小将²

(1. 装备学院研究生管理大队, 北京 101416; 2. 装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要:光电转换效率是激光输能技术的重要指标,如何提高光电转换效率是目前激光输能技术研究的重点。在光电转换基本原理的基础上,分析了光电转换效率的影响因素,介绍了光电转换增效方法,以期为解决光电转换效率较低问题及推进激光输能技术实用化提供参考。

关键词:激光输能;光电转换效率;增效方法

中图分类号:V528 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.001

Research status of photoelectric conversion efficiency enhancement in laser energy transmission technology

LI Bei-bei¹, LI Xiao-jiang²

(1. Company of Postgraduate Management, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China;

2. State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Photoelectric conversion efficiency is an important index of laser energy transmission technology. Based on the basic principle of the photoelectric conversion, the influence factors of the photoelectric conversion efficiency were analyzed, and the efficiency enhancement methods were presented, which provides a theoretical method reference for the problems of the low photoelectric conversion efficiency in the practical application of laser energy transmission technology.

Key words: laser energy transmission; photoelectric conversion efficiency; efficiency enhancement

1 引言

随着航天技术的发展,航天器的应用范围日益广泛,航天器的能源供应方式越来越难以满足实际需求,亟需一种可靠、高效、安全、持续的能量供给方式为航天器供能,激光输能作为一种新的无线能量传输方式被提出,在解决航天器供能、地面无线能量传输以及临近空间飞行器能源供应问题方面具有巨大应用潜力。激光输能系统主要包括两大部分:激光发射部分和激光接收部分,其中激光发射部分由激光产生系统、光学机械系统、捕获跟踪瞄准系统和控制系统组成,激光接收部分由光电转换装置和电源管理装置组成^[1]。光电转换装置是将激光能量转化为电能的

装置,而光电转换效率是激光输能技术的重要指标,其定义为光电池外部回路连接最佳负载电阻时的输出功率(即最大输出功率)在输入功率中所占比重^[2]。目前,光电转换效率较低是激光输能技术的瓶颈,许多学者开展了激光输能光电转换增效方法的研究。本文首先简述了光电转换的基本原理,之后分析了激光辐照过程中光电转换效率的影响因素,介绍了几种典型的光电转换增效方法,希望对激光输能光电转换效率的研究提供有益的帮助。

2 光电转换基本原理和光电转换效率影响因素

2.1 光电转换基本原理

激光输能的光电转换装置是光电池。光电池是

基金项目:激光推进及其应用国家重点实验基础研究项目(No. 7130629)资助。

作者简介:李贝贝(1991-),男,硕士研究生,研究方向为武器系统与运用工程。E-mail:1603020650@qq.com

收稿日期:2016-01-27;修订日期:2016-03-10

利用半导体 P-N 结在激光照射下,产生光生伏特效发电的电池,其原理与太阳能电池相似,但用于激光输能光电池的特征参数与入射激光的波长和强度匹配性比太阳能电池更好,可以获得更高的光电转换效率,更高的输出电压。

目前光电池的应用和研究中,辐照源大多数来自于太阳光,另外出于科学研究和实际应用的需要还会用到白炽灯、发光二极管和红外线管形卤钨灯等,激光输能则是以激光作为辐照源。尽管辐照源多种多样,但无论采用何种辐照源,其实现光电转换的实质都是利用半导体对光子的吸收作用和半导体的光生伏特效实现光能到电能的转换。

光电池实现光电转换的前提是能够吸收进入其内部的光子。一束光照射在光电池表面时,由于材料的特性,一部分光子会被表面反射,一部分透射过半导体表面,半导体对透射过的光子进行吸收才能将光能转换为电能。半导体对光子的吸收作用有多种,一般分为本征吸收、自由载流子吸收、晶格振动吸收、激子吸收和杂质吸收。本征吸收是半导体最重要的吸收方式,发生本征吸收的条件是光子的能量超过材料的能隙宽度。

光电池发电实际是利用光照射半导体时发生光生伏特效而产生电能,如图 1 所示,为最基本的单 P-N 结光电池^[3-4]。

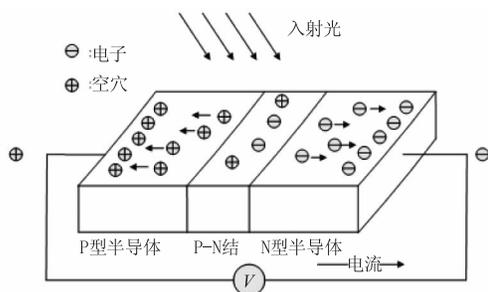


图 1 光电池光电转换原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photovoltaic photoelectric conversion

当具有一定强度的光照射到半导体表面时,透进其内部且能量足够的光子会破坏半导体原有的平衡状态,激发原处于价带中的电子跃迁到导带,从而形成电子-空穴对,即光生载流子。在有 P-N 结的情况下,由于 N 型半导体具有透过电子而阻挡空穴的特性,P 型半导体具有透过空穴而阻挡电子的特性,因此电子向 N 型半导体移动,空穴向 P 型半导体移动,这样,两极之间如果连接上导线,就会有

电荷的流动,从而产生电能。

2.2 光电转换效率的影响因素

从光电转换基本原理可看出,影响光电转换效率因素大致可分为两类:光电池自身因素和外部因素。

(1) 光电池自身因素

自身因素主要与光电池的材料和制作工艺有关,包括光学方面的影响因素和电学方面的影响因素^[5-6]。

光学方面的影响因素主要指材料表面光的反射、接触栅线的遮挡、材料的光谱特性等。当光照射到光电池表面,一部分能量被吸收,一部分能量被反射,当太阳光照射表面未经处理的硅光电池时只能利用 67.4% 的光能,减少了电池内部对光子吸收,从而影响光电转换效率;电池正面被接触发射极的金属栅线覆盖,由此遮蔽激光而造成一部分损失,一般的硅光电池的正面遮光面积为 7%,若可以减小遮光损失则有利于提高光电转换效率;电池材料的光谱特性使电池只吸收一定光谱范围内的光束,而激光是单色光,只有特定能量间隙的半导体材料才能与一定波长的激光产生响应,而且光能不能完全被材料吸收,一个光子只能产生一个电子-空穴对,其余能量转化为热能散失,造成能量损失,影响光电转换效率。半导体材料与激光波长匹配性越好,光电转换效率越高,不同半导体材料与光电转换效率的关系如图 2 所示^[7]。

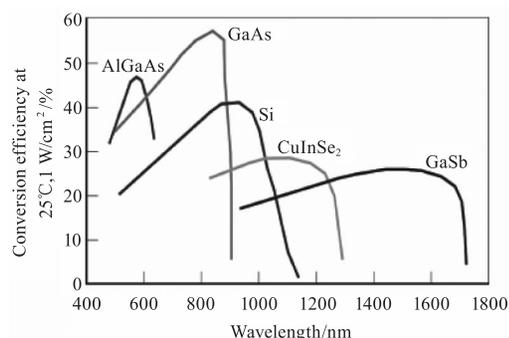


图 2 不同材料光电池转换效率与波长的关系

Fig. 2 Conversion efficiency versus wavelength of different photovoltaic materials

电学方面的影响因素主要指材料内部光生载流子复合和金属栅线的接触电阻等。由于材料制作过程中工艺缺陷,导致材料表面形成复合中心,缺陷越多,光生载流子扩散时经复合中心损失的载流子越多,造成一部分能量损失,对光电转换效率有消极作

用;金属栅线的接触电阻主要包括串联电阻和并联电阻。串联电阻是指电池本身的体电阻、电池表面金属栅线与材料的接触电阻和金属电极自身电阻等。串联电阻增大,会导致短路电流减小,从而影响光电转换效率;并联电阻是由电池材料的P-N结的缺陷造成,包括晶体缺陷和外部掺杂沉积物形成的漏电流和漏电极。并联电阻使光生电流产生反向分流,并联电阻越大,漏电流越小,开路电压就越大,有利于提高光电转换效率。串并联电阻都对填充因子有很大影响,而填充因子可表示最大输出功率与开路电压和短路电流乘积之比,是衡量光电池输出特性的重要指标,因此,改善电池制作工艺,减小串联电阻或增加并联电阻,可以有效提高光电转换效率。

(2) 外部因素

激光输能过程中光电转换效率的外部影响因素主要是温度、入射激光特性和环境条件。

温度是光电转换效率的重要影响因素。激光功率密度比较大,在激光辐照光电池过程中容易产生高温,而光电池的重要参数大多与温度密切相关,温度升高时光电池能隙宽度会降低,短路电流会随温度上升呈线性升高,开路电压随着温度上升呈对数降低,填充因子也随温度上升而下降,由于开路电压下降幅度大于短路电流的增加幅度,光电转换效率随温度升高而大幅下降^[8]。

入射激光直接影响光电转换效率,其特性是指激光的类型(连续或脉冲)、激光波长和激光强度等。激光波长与特定能量间隙的半导体材料相匹配时光电转换效率更高,硅电池对应的最佳波长约为980 nm, GaAs 对应的约为800 nm^[9];不同类型和不同强度的激光辐照光电池除了对光电转换效率的直接影响外,还会产生温升效应导致温度上升的程度不同,进而对光电转换效率造成不同的影响。

环境条件对光电转换效率也有较大影响。大气环境对激光传输有严重的削弱作用,激光经过大气时会产生热晕和湍流现象,降低激光传输到光电池上的能量,影响光电转换效率。

3 几种典型的激光输能光电转换增效方法

目前国内外关于提高激光输能光电转换效率的典型方法主要包括:光电池接收装置改进、光电池材料优选、光电池结构优化、光电池阵列优化排布和光电池工作环境改善等。

3.1 光电池接收装置改进

从上节分析的光学方面影响因素可知,光照射

到传统的光电池接收装置(单独光电池板)上,光的反射对光电转换效率会产生不利的影 响,提高激光输能光电转换效率可以通过改进光电池接收装置减小光的反射损失来实现。NASA 马歇尔太空飞行中心的 Joe T. Howell 和恩特凯公司以及阿拉巴马汉茨维尔大学的研究人员为减小激光辐照光电池时光的反射损失,在第四届空间太阳能国际会议上提出了一种利用菲涅尔透镜的光电池接收装置,该装置之前已经用于太阳能的接收,取得了显著的成效,并在质量和费用上占有优势^[10],如图3所示,NASA、恩特凯公司等研究团队的人员研制的迷你顶状透镜 Mini-Dome Lens。

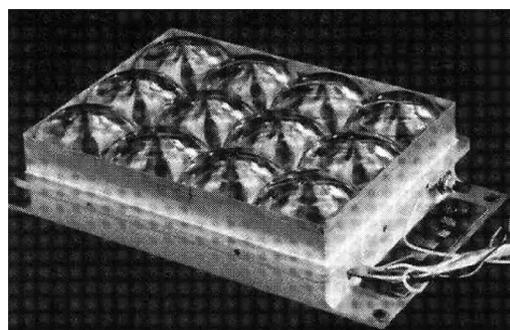


图3 迷你顶状透镜

Fig. 3 Mini-Dome Lens

这种接收装置的原理是利用菲涅尔透镜将入射光聚光后照射到光电池上,且光束在折射的过程中通过外层折射和内层棱镜折射实现入射角和出射角相等,以最小化在两个折射面的折射损失,如图4所示。

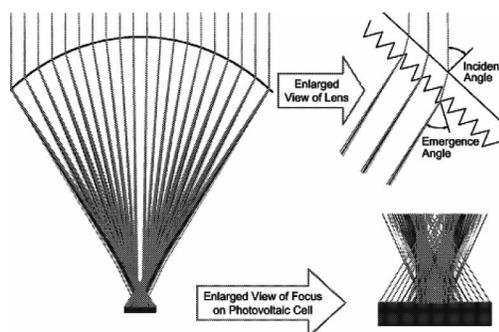


图4 对称-折射型菲涅尔透镜

Fig. 4 Symmetric-refractive fresnel lens

Joe T. Howell 等人提出将这种结构用于专门针对激光辐照的接收转换装置。由于激光光谱特性与太阳光的不同,需要对光电池的结构进行改变,其使用了砷化镓电池,接收装置将 Mini-Dome Lens 进行了改进,如图5所示,该装置可以调节透镜与光电池之间的距离。实验中,该装置在激光辐照下取得了

45% 的光电转换效率。

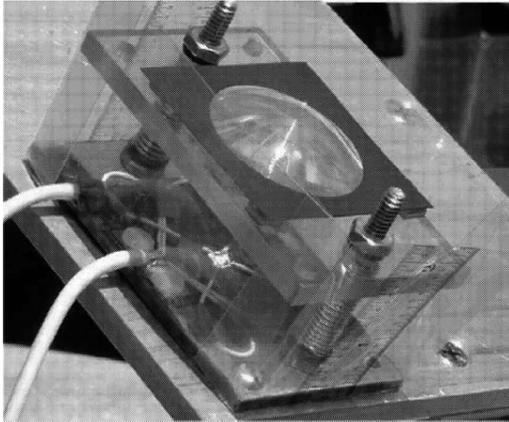


图 5 改进的迷你顶状透镜-砷化镓光电接收装置
Fig. 5 Improved Mini-Dome Lens-GaAs photovoltaic receiver

美国联合创新公司的 Ugur Ortabasi 等人研究了一种可以重复吸收反射光的空腔式球体接收装置^[11]。如图 6 和图 7 所示,该装置由两个半球组成一个空腔,每个半球内部用 11 个光电模块,每个光电模块又由 12 个型号为 HEDA312 的太阳能 Si 电池组成,光电模块的面积占球体腔内总面积的 24%,腔体其他内表面涂上了一层高反射标准面板 (Spectralon) 和金色薄膜。最后通过实验,得到了 14.2% 的效率,文中指出由于以下原因造成了实验结果不太理想:使用的激光波长与使用的光电池不是最匹配的;进入到腔内的光辐射密度太低,只有一个太阳常数的 30% (最佳选择是 500 个太阳常数);用于光电的标准抗反射膜在 1064 nm 的实验波长下仍有 15% 的反射率;光电面积只占腔内面积的 24%。但文章指出,在克服了这四个条件限制的情况下,预期转换效率可以超过 60%。

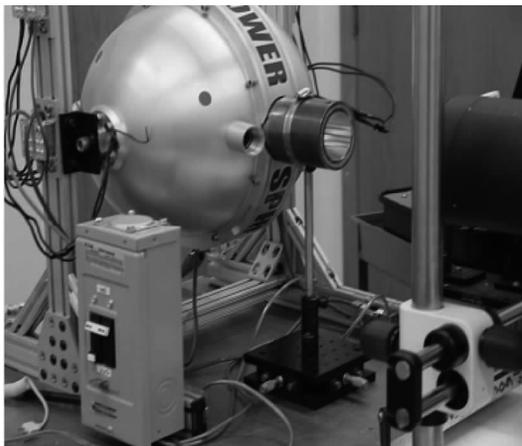


图 6 空腔式球体光电转换装置
Fig. 6 Cavity-type ball photoelectric conversion device



图 7 空腔式球体内部结构
Fig. 7 Cavity-type ball inner structure

3.2 光电池材料优选

由于光电池材料的光谱特性,激光输能过程中光电池材料的选择对光电转换效率会产生较大影响,不同光电池材料对光的吸收能力不同,与激光波长和强度相匹配的光电池材料能获得更高的光电转换效率。文献[12]中指出同一太阳光光照条件下的不同材料光电转换效率是不一样的,传统 Si 电池转换效率理论极限为 25%,而 GaAs 电池转换效率的理论极限为 29%。对于波长与光电池材料相匹配的激光而言,光电池对其吸收率会远强于对太阳光的吸收。文献[13]中指出传统 Si 电池和 GaAs 电池在激光辐照下转换效率分别可超过 40% 和 50%。从中可以看出,无论是太阳光照还是激光辐照, GaAs 电池的光电转换效率要比 Si 电池高。因此,对光电池材料进行优选可以有效提高光电转换效率。

3.3 光电池结构优化

改善光电池结构,可降低光电池的串联电阻、表面金属栅线遮挡等因素对激光输能光电转换效率产生的不利影响。Taysir Nayfeh, Brian Fast 等人^[14]提出了用于高能激光输能 (High Intensity Laser Power Beaming, HILPB) 光电池最重要的四个特性:光电池能转换的最大输入光照强度、光谱响应特性、热响应能力、对能量变化的敏感性,并介绍了一种改进的垂直多结型光电池,如图 8 所示。这种光电池结构有多个好处:由于这种结构是边缘辐照,所以在辐照表面就不需要布电路线路,避免了金属栅线的遮挡,从而可以让更多的光子能量畅通无阻地进入光电池;由于在 P-N 结间隙也能产生过剩载流子,因而增加了光子碰撞的机会,提高了光生载流子浓度,有利

于提高光电转换效率。

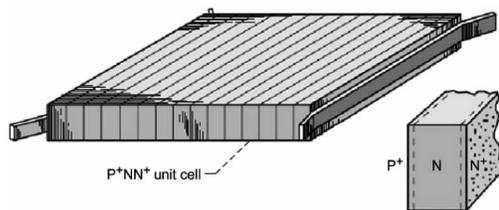


图8 垂直多结型 Si 光电池

Fig. 8 Vertical multi-junction Si photovoltaic cell

西安航谷微波光电科技有限公司分别研究了 GaAs 三角形、扇形单元电池的电极结构及其组合电池,这两种结构都减小了载流子由 P 型主电极向 N 型电极的传输距离,从而减小了外延层电阻(自身体电阻),减小的串联电阻,有利于提高光电转换效率^[15-16],如图 9 和图 10 所示,1 和 5 为 N 型电极;2、3 和 4 为 P 型电极;6 为电极连线。

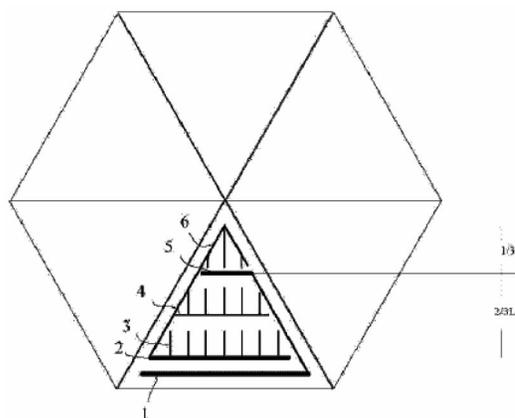


图9 三角形电池结构

Fig. 9 Triangular cell structure

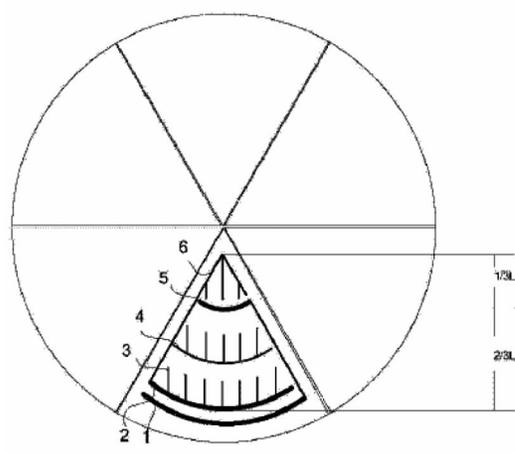


图10 扇形电池结构

Fig. 10 Fan-shaped cell structure

3.4 光电池阵列优化排布

激光输能使用的激光束是高斯光束,其光斑能量分布不均匀,中间能量高,四周能量低,这种不均匀的能量分布使光电池板上各光电池片受到的激光辐照强度不同,对光电池板的光电转换效率有不利的影响^[17]。对此,2011 年 NASA 的 Daniel E. Raible 和 Dragos Dinca 等人对光电池的阵列排布进行了研究,并比较了星形阵列和方形阵列的差别^[18]。如图 11 和图 12 所示,分别为方形光电接收器和星形光电接收器,两种接收器使用的 9 块光电池都是上文中提到的垂直多结型光电池。由于星形阵列排布比方形阵列排布更优,在实验中,星形光电接收器的光电转换效率更高,取得了 44.39% 的光电转换效率。从中可以看出,优化光电池阵列排布使光电池尽量布置在相同光照强度的位置,可减少光电池因接收的光强不同而造成光失配损耗,从而提高光电转换效率。

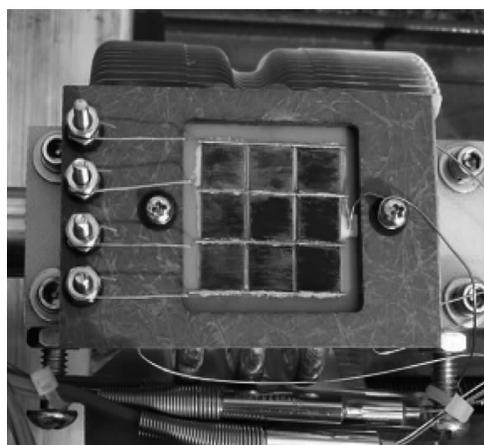


图11 方形光电接收器

Fig. 11 Square photoelectric receiver

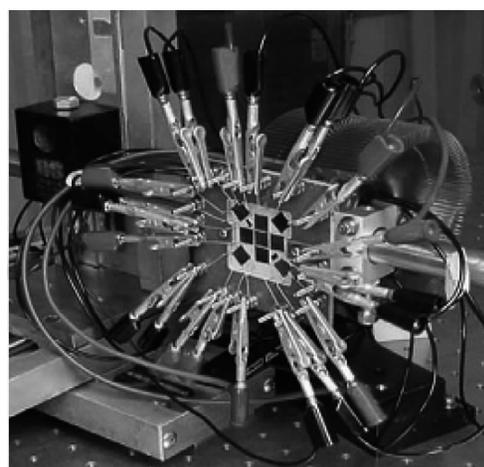


图12 星形光电接收器

Fig. 12 Star photoelectric receiver

3.5 光电池工作环境改善

激光输能过程中光电池在高功率激光辐照下会产生高温,而温度上升会导致光电转换效率降低,有效的降温方式对提高光电转换效率非常重要。目前针对太阳能电池的降温提效方法研究较多,激光输能的冷却方式可从中得到借鉴,通常太阳能采用的冷却方式有:空气冷却、水冷却、制冷工质冷却和太阳光分频降温等^[19],几种冷却方式的对比情况如表1所示,文献[19]中还指出了降温提效技术的研究方向:对电池背板或冷却器的结构和材质进行改造和优化,使冷却介质与被冷却表面能有效地进行换热,提高冷却效率;或选用换热系数大的冷却介质以提高冷却效果。对激光输能中的光电池进行降温处理,还需针对其具体的应用背景(地面或空间)对常用的冷却方式进行改善以便有效提高光电转换效率。

表1 不同冷却方式

Tab.1 The different cooling ways

冷却方式	原理	优缺点
空气冷却	利用空气流动与电池进行热交换	冷却系统结构简单,成本低,操作方便;换热系数低,冷却效果有限
水冷却	利用水的流动与电池进行热交换	系统结构简单,成本较低,无噪音和污染,冷却效果较好;需消耗额外能量,受地域限制
制冷工质冷却	利用热传导和相变原理进行热交换	适用于用电量要求较大的地方,系统使用寿命长,冷却效果好;换热器结构复杂,成本较高
太阳光分频降温	利用分频器将电池能吸收的频段分离出来用于光电转换,减少电池响应波段外太阳光谱的热辐射造成的温度上升	光电转换效率高;技术复杂,生产和维护成本高

4 结论

综上所述,虽然国内外关于提高光电转换效率方法研究有了一定的进展,但光电池材料存在转换效率的理论极限值、温度对光电池的工作性能影响大等因素都会对激光输能光电转换效率产生不利影响,要进一步提高光电转换效率,未来的发展方向应该更多集中于针对高效光电池材料的研究,提高材料对光的吸收能力,而且由于高功率激光辐照光电池产生的温度较高,研究更合适的降温提效方式以及提高材料在高温条件下保持稳定工作性能的能力

也非常重要。

参考文献:

- [1] SHI Dele, LI Zhenyu, WU Shichen, et al. Concept of laser power transmission system for module spacecraft [J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(5): 67-73. (in Chinese)
石德乐,李振宇,吴世臣,等. 模块航天器间激光无线能量传输系统方案设想[J]. 航天器工程, 2013, 22(5): 67-73.
- [2] YUAN Zhen, HE Lilong. The basic characteristics [J]. Modern Electronics Technique, 2007, 30(16): 163-165. (in Chinese)
袁镇,贺立龙. 太阳能电池的基本特性[J]. 现代电子技术, 2007, 30(16): 163-165.
- [3] Sanno Yukino. Solar cells and their applications [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)
桑野幸德. 太阳电池及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [4] Peter wurfel. Physics of solar cells—from principles to new Concepts [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese)
彼得·乌夫尔. 太阳能电池——从原理到新概念[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [5] ZHANG Xitang, REN Mingshu. The factors influencing photoelectric conversion efficiency and improving measures for crystalline silicon solar cell [J]. Information Recording Materials, 2013, 14(4): 36-42. (in Chinese)
张希堂,任明淑. 影响晶体硅太阳能电池片效率的因素分析及改善措施[J]. 信息记录材料, 2013, 14(4): 36-42.
- [6] HAO Huali, LIU Wenfu. Analysis on influence factors of solar cell Efficiency [J]. Modern Electronics Technique, 2015, (12): 156-158. (in Chinese)
郝华丽,刘文富. 太阳能电池效率的影响因素分析[J]. 现代电子技术, 2015, (12): 156-158.
- [7] Krupke W F, Beach R J, Payne S A, et al. DPAL: A new class of lasers for cw power beaming at ideal photovoltaic cell wavelengths [C]. AIP Conference Proceedings, 2004: 367-377.
- [8] LI Xiaojiang, YANG Yewei, LI Beibei. Effect of thermal radiation in space on photovoltaic cell [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(12): 1444-1449. (in Chinese)
李小将,杨业伟,李贝贝. 空间热辐射对激光输能光电特性影响研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(12): 1444-1449.
- [9] Kare J T. Laser power beaming infrastructure for space power and propulsion [J]. Proc Spie, 2006,

- 6222:62220W.
- [10] Joe T Howell, Mark J O' Neill, Richard L Fork. Advanced receiver/converter experiments for laser wireless power transmission [C]. Proceeding of the 4th International Conference on Solar Power from Space, Granada, Spain, 2004.
- [11] Ugur Ortabasi, Herbert Friedman. Powersphere: A photovoltaic cavity converter for wireless power transmission using high power lasers [C]. Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hi, USA, 2006.
- [12] Patel M R. Spacecraft power system [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010: 141 - 142. (in Chinese)
帕特尔. 航天器电源系统 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010: 141 - 142.
- [13] Landis G A. Photovoltaic receivers for laser beamed power in space [J]. Journal of Propulsion & Power, 1993, 9 (1): 105 - 112.
- [14] Taysir Nayfeh, Brian Fast, Daniel Raible, et al. High intensity laser power beaming architecture for space and terrestrial missions [R]. Proceedings of the 18th AFRL/NASA Advanced Space Propulsion Workshop, 2010: 15 - 17.
- [15] SONG Ting. Electrode structure of GaAs fan shaped unit laser cell and combined battery [P]. CN203760490U, 2014 - 08 - 06. (in Chinese)
宋婷. 一种 GaAs 扇形单元激光电池的电极结构及其组合电池 [P]. CN203760490U, 2014 - 08 - 06.
- [16] SONG Ting. Electrode structure of GaAs Triangular unit laser cell and combined battery [P]. CN203910816U, 2014 - 10 - 29. (in Chinese)
宋婷. 一种 GaAs 三角形单元激光电池的电极结构及其组合电池 [P]. CN203910816U, 2014 - 10 - 29.
- [17] CHENG Kun, DONG Hao, CAI Zhuoran, et al. Scheme design of high efficiency long distance laser power transmission [J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24 (1): 8 - 12. (in Chinese)
程坤, 董昊, 蔡卓燃, 等. 高效率远距离激光无线能量传输方案设计 [J]. 航天器工程, 2015, 24 (1): 8 - 12.
- [18] Daniel E Raible, Brian R Fast, Dragos Dinca. Comparison of square and radial geometries for high intensity laser power beaming receivers [C]. 2011 International Conference on Space Optical Systems and Application, 2011.
- [19] MA Jiuming, LI Jiayi, QIN Hong, et al. Research progress of solar cell cooling and improving efficiency technology [J]. Materials research and application, 2014, 8 (1): 6 - 9. (in Chinese)
马久明, 李嘉怡, 秦红, 等. 太阳能电池降温提效技术的研究进展 [J]. 材料研究与应用, 2014, 8 (1): 6 - 9.