

# 高效激光无线能量传输及转换实验

何 滔 杨苏辉 张海洋\* 赵长明 徐 鹏 郝嘉胤 王华昕

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要** 分布式可重构卫星是一种新型的“模块化”航天器体系结构,各模块航天器可以独立制造及发射,通过空间激光能量传输和数据交互构成一个整体。针对模块航天器间激光无线能量高效传输关键技术,设计并搭建了激光无线能量传输的地面验证系统,通过理论分析了传输激光波长、光电转换材料等系统关键参数对于传输效率的影响,测量 Si、GaAs 等材料对不同波长激光的输出特性及转换效率,实验验证了照射强度等相关参数对传输效率的影响。实验结果表明:以 793 nm 激光为传输介质,基于 GaAs 材料的无线能量传输演示系统的优势较为明显,对激光光-电的转换效率最高能达 48%,系统总的电-激光-电的传输效率为 18%。实验验证了空间激光能量高效率传输的可行性。

**关键词** 光电子学;高效率激光无线能量传输;激光-电转换效率;GaAs 电池

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0317001

## Experiment of Space Laser Energy Transmission and Conversion with High Efficiency

He Tao Yang Suhui Zhang Haiyang Zhao Changming Xu Peng  
Hao Jiayin Wang Huaxin

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** Distributed reconfigurable satellite system is a new type of "modular" spacecraft architecture. Each module of the spacecraft can be manufactured and launched independently, and they form a whole by space laser energy transmission and data exchange. In order to study the key technologies of space laser energy transmission and improve the transmission efficiency, a ground verification experiment of the laser energy transmission system is designed. The key parameters like the output characteristics and conversion efficiency of GaAs cells to different wavelengths of laser are measured. The relationship between the laser intensity and transmission efficiency is analyzed. The experimental results show that with 793 nm laser for the transmission medium, GaAs cells' laser to electric conversion efficiency is up to 48%, and that the whole electric-laser-electric transmission efficiency of system is 18%. The experiment verifies the feasibility of efficient laser energy transmission.

**Key words** optoelectronics; high efficiency laser wireless energy transmission; laser to electric conversion; GaAs cell

**OCIS codes** 350.6090; 140.2020; 140.3300; 220.3620

## 1 引 言

航天事业的发展以及新能源技术的开发,使得航天器体系结构越来越大,航天器之间的能量传输

和信息交互也越来越受到重视。2007 年,美国国防部高级研究计划局(DARPA)技术部(TTO)将分离模块概念遴选为正式研究项目,命名为“F6 系统”。

收稿日期: 2012-10-13; 收到修改稿日期: 2012-11-23

基金项目: 国家 863 计划(2012AA120605)资助课题。

作者简介: 何 滔(1987—),男,博士研究生,主要从事激光传输方面的研究。E-mail: hunter51025@gmail.com

导师简介: 杨苏辉(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事固体激光器及激光应用等方面的研究。

E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: ocean@bit.edu.cn

2009年, DARPA 将 F6 项目的第二阶段合同授予轨道科学公司, 开始进行系统的详细设计及仿真<sup>[1]</sup>。该系统由多个“模块航天器”组成, 每个模块航天器有各自的任务功能, 可以独立制造及发射, 在轨运行时通过无线信息及能源交换将分散的模块功能和资源高效地结合在一起, 使得航天器体系更加灵活, 发射风险和成本低, 提高了系统的寿命和可靠性。其中无线能量传输技术为“F6”的关键技术之一。

空间无线能量传输技术主要包括微波方式和激光方式<sup>[2]</sup>。微波发散角大, 其发射和接收装置面积大, 而激光具有更高的能量密度, 更好的会聚性和发射接收口径, 逐渐取代了微波能量传输的地位。1980年, 美国战略防御机构(US Strategic Defense Initiative)在阿波罗计划中, 将反射镜放置在月球上, 利用激光测距机进行了地球与月球距离测量的实验<sup>[3]</sup>。1997年, 日本 Yugami 等<sup>[4]</sup>做过激光能量传输的场地实验, 发射端选用 CO<sub>2</sub> 连续激光器, 测试过程中最大激光功率为 25 W, 通过口径为 150 mm 离轴抛物面镜进行激光准直, 传输距离为 500 m, 接收端使用 150 mm 的离轴抛物面镜进行会聚, 用功率计直接接收并测量激光能量为 15 W, 最终激光-激光的传输效率为 60%; 同时测试了 808 nm 的半导体激光器照射尺寸为 2 cm × 2 cm 的单结 GaAs 电池芯片, 激光-电转换效率为 40%。2002年, Steinsiek 等<sup>[5]</sup>进行了地面激光能量传输的实验。他们用 Nd:YAG 全固态激光器倍频输出 532 nm 的激光来驱动装备有光伏电池的小车, 传输距离为 30~300 m, 激光功率为 5 W, 光伏电池的材料为 InGaP, 激光-电的转换效率为 25%。2006年, 日本 Kinki 大学<sup>[6,7]</sup>利用波长为 808 nm 光纤耦合半导体激光器, 激光功率为 200 W, 给装配有光伏电池的风筝、直升机激光供能, 激光器电-光转换效率为 34.2%, 光伏电池组件由 30 片 4 cm × 7 cm 的 GaAs 电池芯片组成, 激光-电转换效率为 21%, 总的电-光转换效率为 7.2%。2012年, 美国国家航空航天局(NASA)<sup>[8]</sup>利用望远镜系统传输 8 kW 连续激光驱动太空电梯, 用硅基光伏电池阵列粘附在电梯上。激光器为光纤输出的半导体抽运固体激光器, 波长为 1030 nm, 由 333 片 1 cm × 1 cm 的单晶硅芯片组成光伏电池阵列, 单个单晶硅电池的转换效率为 35%。

本文设计了一种高效率的激光能量传输系统。通过光纤输出半导体激光器发射激光, 经过整形后传输 10 m, 再接收聚焦到光伏电池芯片, 转换成电

能。在实验过程中计算整个传输过程的电-激光-电的传输效率。

## 2 理论设计

光伏电池在单波长激光照射下的效率高于宽波段太阳光照射下的效率, 并且连续光源照射效率要高于脉冲光源照射效率, 因此选用连续单波长激光作为能量传输介质。由于光子能量正比于其本身的能量, 从而光源的频率则直接影响光伏电池能带跃迁。但是材料对于激光波长的选择性也非常重要, 因此需要综合考虑激光波长和光伏电池材料的关系。光伏电池在特定的匹配的光波长照射下会有更高的转换效率。太阳光谱照射效率与单色光照射效率的关系为<sup>[9]</sup>

$$\eta_{\text{laser}} = \eta_{\text{solar}} \frac{P_{\text{sun}}}{J_{\text{sc}}} \eta_{\text{QE}} \frac{\lambda}{1240} \left[ 1 + \frac{25}{V_{\text{oc}}} \ln \left( \eta_{\text{QE}} \times \frac{\lambda}{1240} \times \frac{P_{\text{laser}}}{J_{\text{sc}}} \right) \right], \quad (1)$$

式中  $\eta_{\text{laser}}$  为光伏电池在激光照射下的转换效率,  $\eta_{\text{solar}}$  为光伏电池在太阳光照射下的转换效率,  $P_{\text{sun}}$  为测试  $\eta_{\text{solar}}$  时的太阳光强,  $J_{\text{sc}}$  为太阳光照射下的短路电流密度,  $V_{\text{oc}}$  为太阳光照射下的开路电压(mV),  $P_{\text{laser}}$  为激光光强,  $\eta_{\text{QE}}$  为在激光波长为  $\lambda$ (nm) 时的内部量子效率。

为了客观地反映入射激光波长与光伏电池材料的关系, 采用 Krupke 等<sup>[10]</sup>在 2003 年的测试结果(如图 1 所示)来帮助选择合适的波长和材料。

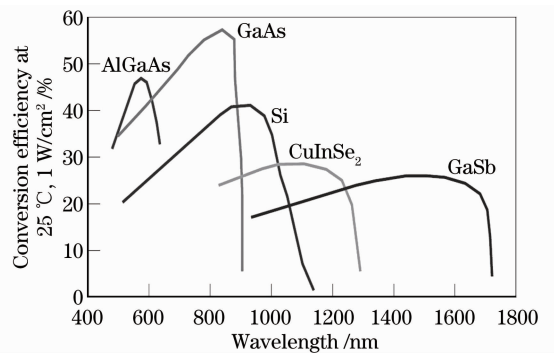


图 1 不同材料光伏电池转换效率与波长的关系  
Fig. 1 Conversion efficiency versus wavelength of different photovoltaic (PV) materials

选取了对太阳光转换效率相对较高的砷化镓、单晶硅电池和现阶段对太阳光转换效率高达 40% 的三结 GaInP/GaInAs/Ge 电池<sup>[11]</sup>进行对比, 在 25 °C (光伏电池标准测试温度) 情况下测得不同太阳光聚光倍数下转换效率如表 1 所示。

表1 单晶硅、砷化镓、三结电池太阳光转换效率

Table 1 PV conversion efficiency of Si, GaAs, GaInP/GaInAs/Ge(solar)

Sun	Si	GaAs	GaInP/GaInAs/Ge
1×	15%	15%	30%
50×	15%	24%	32%
150×	16%	27%	34%

由表1可看出三结 GaInP/GaInAs/Ge 电池与 GaAs 的太阳光转换效率较高。由图1可知 GaAs

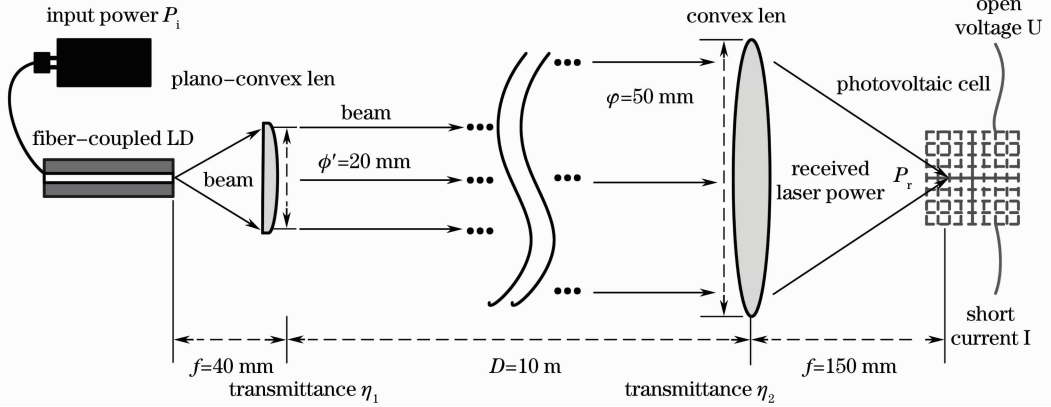


图2 10 m 激光能量传输系统原理图

Fig. 2 Laser energy transmission system

### 3.1 激光器

由于半导体激光器具有高电-光转换效率  $\eta_{e-o}$ ，体积小，重量轻，低成本等优点，并且半导体激光器可以提供满足光伏电池吸收峰的 800 nm 左右的激光。但是其光束质量差、辐射强度差的缺点也很明显，远距离传输激光能量衰减严重<sup>[12]</sup>，适于小功率短距离传输的情况，因此选取了波长为 793 nm 和 808 nm 的半导体激光器作为激光发射装置。实验中 793 nm 及 808 nm 激光器输出最大激光功率为 2.2 W，光纤芯径为 100  $\mu\text{m}$ ，数值孔径为 0.22。

### 3.2 发射及接收光学系统

接收镜的大小与接收光斑大小成正比。本次实验为激光能量传输的验证及仿真实验，传输距离为 10 m，短距离实验激光发散程度小，会聚透镜参数满足

$$d_{\text{NA}} = \sin \mu, \quad (2)$$

$$\phi' = 2 \times f \times \tan \mu, \quad (3)$$

式中  $\mu$  为物镜孔径半角； $\phi'$  为透镜口径； $f$  为透镜焦距。由此选用口径为 20 mm、焦距 40 mm 的平凸透镜作为会聚透镜。接收透镜的参数满足

$$\theta \approx \phi / f, \quad (4)$$

$$\varphi = 2 \times D \times \tan \theta + \phi', \quad (5)$$

式中  $\theta$  为发散角； $\phi$  为光纤芯径； $\varphi$  为透镜口径； $D$  为

电池的接收峰在 800 nm 左右。因而在用波长为 800 nm 左右激光照射实验中，GaAs 显示出更高的转换效率，而单晶硅和三结 GaInP/GaInAs/Ge 电池对 800 nm 左右激光响应不明显，原因是硅和构成三结电池的三种材质的吸收峰并不在 800 nm 左右。

## 3 实验设计

图2为10 m激光能量传输系统原理图。

传输距离。选用口径为 50 mm、焦距为 150 mm 的凸透镜作为接收透镜。

图2中激光器电源输入功率  $P_i$ ，激光器输出功率为  $P$ ，凸透镜的透射率分别为  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ ，接收端光伏电池板接收到的激光功率为  $P_r$ ，光伏电池光-电转换后输出开路电压  $U_o$ ，短路电流  $I_s$ ，其中理想输出功率为

$$P_{os} = U_o I_s, \quad (6)$$

理想光电转换效率为

$$\eta_{os} = \frac{U_o I_s}{P_r}, \quad (7)$$

填充因子为  $f_{\text{FF}}$ <sup>[13]</sup>，光伏电池的最大输出功率与填充因子  $f_{\text{FF}}$  有关系为

$$f_{\text{FF}} = U_{\text{max}} I_{\text{max}} / (U_o I_s), \quad (8)$$

硅光电池的填充因子一般为 70% ~ 90%，三结 GaInP/GaInAs/Ge 与砷化镓电池填充因子一般为 80% ~ 90%。光伏电池的转换效率为

$$\eta_{o-e} = \frac{U_o I_s}{P_r} \times f_{\text{FF}}, \quad (9)$$

激光能量传输电-电的转换效率为

$$\eta_{e-e} = \eta_{e-o} \eta_1 \eta_2 \eta_{o-e}, \quad (10)$$

式中  $\eta_{e-o}$  为激光器的电-光转换效率， $\eta_{o-e}$  为光伏电池的光-电转换效率。

### 3.3 接收装置

激光接收装置由光伏电池、半导体制冷片、散热片、散热风扇组成。光伏电池紧贴在铜质基底上,再通过热电致冷器(TEC)制冷片将铜质基底上的热量导走,风扇和散热片起到辅助散热的作用。同时通过温度控制器控制光伏电池板的温度,可以实现在不同温度下的测量转换效率。由于实验尚处于小场

地验证测试阶段,传输激光功率低,光伏电池温度变化小,产热小,对光电转换效率影响微弱,未将 TEC 制冷片及风扇耗能计算在总效率以内。

图 3 为接收器,光伏电池主要有单晶硅和 GaAs。单晶硅电池芯片有效面积为  $100 \text{ mm}^2$ 。GaAs 电池芯片有效面积为  $25 \text{ mm}^2$ ,芯片表面蒸镀减反膜。



图 3 激光能量传输接收器

Fig. 3 Laser energy transmission receiver

## 4 实验结果及分析

### 4.1 实验结果

测试条件为无背景光照下,光伏电池恒温  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,用  $793 \text{ nm}$  和  $808 \text{ nm}$  激光传输  $10 \text{ m}$  后分别会聚照射在电池芯片上。利用光功率计测量光伏电池芯片接收到的激光功率,在接收不同激光功率下,利用短路电流-开路电压法测量单晶硅、GaAs 电池输出特性及其理想光电转换效率,并分析对比不同波长照射条件下两种材料光-电转换效率。

图 4~7 为光伏电池对  $793 \text{ nm}$ 、 $808 \text{ nm}$  激光的响应的输出特性曲线。

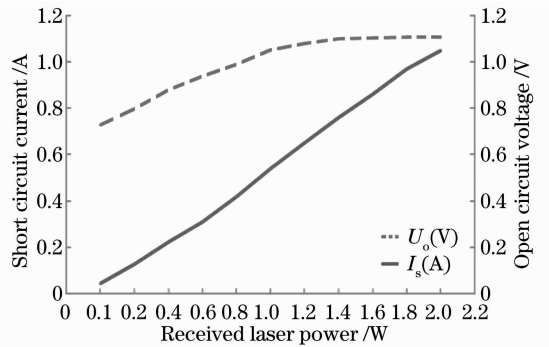


图 5 GaAs 电池对  $808 \text{ nm}$  激光的响应输出特性

Fig. 5 GaAs output characteristics of  $808 \text{ nm}$

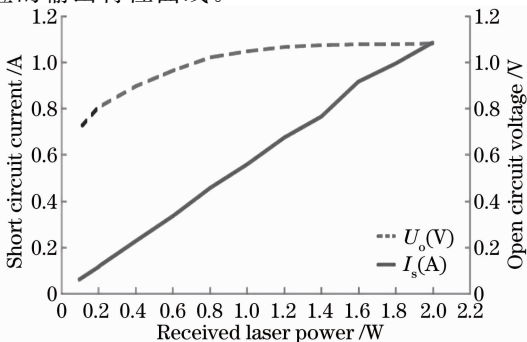


图 4 GaAs 电池对  $793 \text{ nm}$  激光的响应输出特性

Fig. 4 GaAs output characteristics of  $793 \text{ nm}$

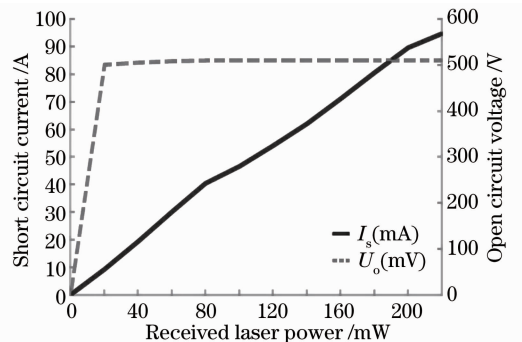


图 6 单晶硅对  $793 \text{ nm}$  激光的响应输出特性

Fig. 6 Si output characteristics of  $793 \text{ nm}$

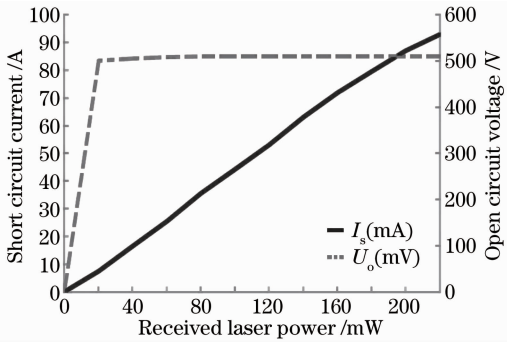


图7 单晶硅对 808 nm 激光的响应输出特性

Fig. 7 Si output characteristics of 808 nm

由图 4~7 可知,单晶硅和 GaAs 电池短路电流随激光功率密度呈线性增长,开路电压随激光功率密度增大慢慢趋近饱和。对比单晶硅和 GaAs 输出特性图,GaAs 的输出开路电压及短路电流比单晶硅要高。

由于加工工艺、材料等原因,两种材料在不同波长激光照射下,输出的输出电压、电流和输出功率都存在一定的区别。其中从图 6 和图 7 中可以看出,单晶硅在较小的照射功率下电压即达到了饱和。

图 8、9 分别为 GaAs 和单晶硅电池对 793 nm 和 808 nm 激光的转换效率。

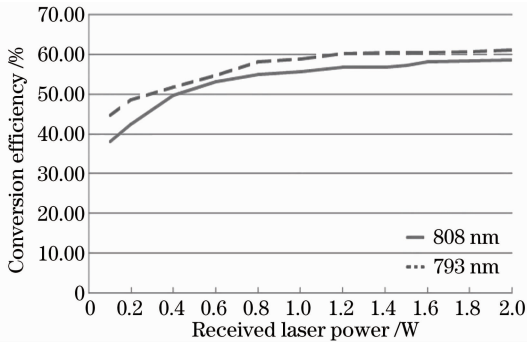


图8 GaAs 电池对 793 nm、808 nm 激光的转换效率

Fig. 8 GaAs conversion efficiency for 793 nm and 808 nm laser wavelengths

图 8 显示在激光功率达到 1 W 以后,GaAs 的理想光-电转换效率保持在 55% 以上。且 GaAs 对 793 nm 激光的光-电转换效率要高于 808 nm 激光,理想光电转换效率最高为 60%。图 9 显示单晶硅电池对 808 nm 激光的转换效率要高于 793 nm,理想光电转换效率最高为 23.9%。对比可得,基于 GaAs 电池的接收系统激光-电转换效率高于单晶硅,且单位面积上的输出功率要远高于基于单晶硅电池的系统。

图 10 为利用短路电流-开路电压法测量的单结 GaAs 芯片对 793、808、825、880 nm 激光的理想光

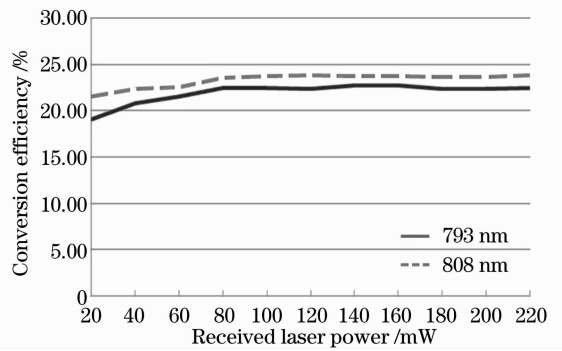


图9 单晶硅电池对 793 nm、808 nm 激光的转换效率

Fig. 9 Conversion efficiency of Si cell for 793 nm and 808 nm laser wavelengths

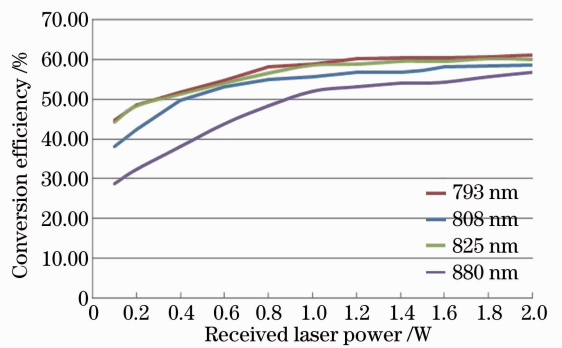


图10 GaAs 电池对不同激光波长的转换效率

Fig. 10 Conversion efficiency of GaAs cell for different laser wavelengths

电转换效率测试曲线。测试条件为无背景光照下,光伏电池恒温 25 ℃。

## 4.2 效率计算

以激光波长为 793 nm,选取功率为  $P=2.2$  W 的条件下测试传输效率。根据此时激光器工作电压及电流计算得激光器电-光转换效率  $\eta_{e-o}=42.4\%$ ,测量并计算得两透镜效率分别为  $\eta_1=92.5\%$  和  $\eta_2=96.2\%$ (未镀增透膜),GaAs 电池光-电转换效率为  $\eta_{o-e}=48.0\%$ (填充因子  $f_{FF}=80.0\%$ ),最终激光能量传输 10 m 的电-电转换效率  $\eta_{e-e}=18.1\%$ 。

## 5 结 论

设计了一种高效率空间激光能量传输的验证实验系统,设计并制作了新型的激光接收器,测量了系统的关键参数,解决了空间激光能量传输的部分技术难点,光伏电池光-电转换效率达到 48%,激光无线能量传输 10 m 的电-电效率达到 18.1%。现阶段只运用了低功率的半导体激光器,GaAs 电池还远远没有达到最大输出功率,可以增大激光功率,同时可以增大 GaAs 电池尺寸,增强电输出功率;温度

对 GaAs 激光-电转换效率也有一定的影响,温度越低,效率越高。传输距离可以进一步加大,同时需要考虑大气传输的效率损耗。由于大尺寸透镜加工难度大,接收端可以采用共轴或离轴卡塞格林接收系统;发射端和接收端的校准可以采用自动追踪系统,使得系统更加自动化。空间激光能量传输的高效率光-电转换实验为“F6 系统”提供了可靠的技术支持,为空间激光能量传输打下了理论和实验基础。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Hao, Liang Wei. Development of DARPA's F6 program[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, **19**(2): 92~98  
刘 豪, 梁 巍. 美国国防高级研究计划局 F6 项目发展研究[J]. *航天器工程*, 2010, **19**(2): 92~98
- 2 N. Tesla. World system of wireless transmission of energy[J]. *Telegraph and Telephone Age*, 1927, (20): 457~460
- 3 J. Dickey, P. Bender, J. Faller *et al.*. Lunar laser ranging: a continuing legacy of the apollo program [J]. *Science*, 1994, **265**(5171): 482~490
- 4 H. Yugami, Y. Kanamori, H. Arashi *et al.*. Field experiment of laser energy transmission and laser to electric conversion[C]. Honolulu; Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1997, **1**: 625~630
- 5 F. Steinsiek, W. P. Foth, K. H. Weber *et al.*. Wireless power transmission experiment as an early contribution to planetary exploration missions [C]. Bremen: the 54th International Astronautical Congress, 2003, **3**: 169~176
- 6 N. Kawashima, K. Takeda, K. Yabe. Application of the laser energy transmission technology to drive a small airplane [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(s1): 109~110
- 7 Carlos Balaguer, Mohamed Abderrahim. Robotics and Automation in Construction[M]. Intech, 2008. 373~380
- 8 D. E. Becker, R. Chiang, C. C. Keys *et al.*. Photovoltaic-concentrator based power beaming for space elevator application [C]. AIP Conference Proceedings, 2010, **1230**: 271~281
- 9 G. A. Landis. Photovoltaic receivers for laser beamed power in space[J]. *J. Propulsion and Power*, 1993, **9**(1): 105~112
- 10 W. F. Krupke, R. J. Beach, S. A. Payne *et al.*. DPAL: a new class of lasers for CW power beaming at ideal photovoltaic cell wavelengths [C]. Melville; 2nd International Symposium on Beamed Energy Propulsion, 2003
- 11 Wang Wenbo, Li Ming, Ji Xu *et al.*. Investigation of the output characteristics of GaAs solar cell based on Fresnel concentrating system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0716003  
王文博, 李 明, 季 旭 等. 菲涅耳聚光系统下砷化镓电池输出特性研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 198~204
- 12 Zhang Heyong, Guo Jin, Zhao Shuai *et al.*. Experimental property research of far-field focusing of laser beam[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302005  
张合勇, 郭 劲, 赵 帅 等. 激光远场聚焦特性实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302005
- 13 Wu Dingyun, Peng Yufeng, Zhao Jichang *et al.*. Analyses of structure parameters of amorphous silicon film photovoltaic cells [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 093102  
吴定允, 彭玉峰, 赵纪昌 等. 非晶硅薄膜光伏电池结构参数分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(9): 093102

栏目编辑:何卓铭