文章编号：1001-3806(2020)05-0538-08

激光无线能量传输技术的发展

赵长明[1]，王云石[1]，郭陆灯[1]，张海洋[1]，张子龙[1]，张立伟[2]，郑　征[3]，李　建[3]

(1. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室，北京 100081；2. 中国电子科技集团 电子科学研究院，北京 100041；3. 中国电子科技集团 海洋信息研究院，陵水 572427)

摘要： 无线能量传输技术包括微波无线能量传输与激光无线能量传输(LWPT)两种技术途径。介绍了 LWPT 技术的基本概念，综述了 LWPT 技术的国内外发展历史和现状，分析了 LWPT 技术的主要研究内容，预测了 LWPT 技术的发展方向和可能的应用。对比国内外情况可知，国内 LWPT 研究还处于理论和应用初期，需要更多地投入推动其发展进步。

关键词： 激光技术；无线能量传输；激光电池；传输效率

中图分类号： O436　　**文献标志码：** A　　**doi**：10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2020.05.003

Development of laser wireless power transmission technology

ZHAO Changming[1], *WANG Yunshi*[1], *GUO Ludeng*[1], *ZHANG Haiyang*[1], *ZHANG Zilong*[1], *ZHANG Liwei*[2], *ZHENG Zheng*[3], *LI Jian*[3]

(1. Opto-electronics Imaging Technology and System Key Laboratory of Education Ministry, School of Optics & Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. China Academic of Electronics and Information Technology, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100041, China; 3. Ocean Information Co. Ltd., China Electronics Technology Group Corporation, Lingshui 572427, China)

Abstract: Wireless power transmission (WPT) technology includes two technical approaches: Micro-wave wireless power transmission (MWPT) and laser wireless power transmission (LWPT). In this paper, the basic concepts of LWPT technology was introduced. And the development history and current situation of LWPT technology at home and abroad were summarized. The main research contents of LWPT technology and the development direction and possible application of LWPT technology were reviewed. Comparing the situation at home and abroad, domestic LWPT research is still in the early stages of theory and application, and more investment is needed to promote its development.

Key words: laser technique; wireless power transmission; laser cell; transmission efficiency

引　言

无论微波还是激光，都是携带能量的电磁波，不仅可以用来传递信息，也可以用来传递能量。以激光或微波传递能量，大大拓展了能量传输的概念，丰富了能量传输的方式，为一些特殊场合的供能提供了一条新的途径。

无线能量传输(wireless power transmission, WPT)即以微波或激光的方式，将能量(一般是电能)从空间某一点(电源)传递到另一点(负载)。以微波作为传能载波称为微波无线能量传输(microwava wireless power transmission, MWPT)，以激光作为传能载波称为激光无线能量传输(laser wireless power transmission, LWPT)。由于激光具有波长短、单色性好、方向性好、高单色亮度的特点，一般而言，LWPT 相比于 MWPT 具有设备体积较小、传输距离较远、无电磁干扰的特点。

本文中主要针对 LWPT 的基本系统组成、国内外研究进展、现阶段面临的技术挑战以及未来研究的课题方向进行整理阐述，并对 LWPT 涉及到的技术领域进行了简要总结。

1　激光无线能量传输系统基本组成

LWPT 系统主要包括激光发射系统、激光接收系统、能源管理系统等。激光发射系统由电源、激光驱动器、激光器、激光发射系统、跟踪与瞄准系统等构成；激光接收机由激光电池、散热系统等构成；能源管理系统

作者简介：赵长明(1960-)，男，博士，教授，主要研究方向为激光及光电子信息系统等。

E-mail：zhaochangming@bit.edu.cn

收稿日期：2019-11-28；收到修改稿日期：2019-12-31

包括最大功率点跟踪器、储能电池和能量监测系统等。

LWPT 系统的基本工作原理为:电源为激光器供电,激光器将电能转换成激光并由光学系统准直并发射,通过瞄准与追踪系统获取目标位置并进行实时跟踪,控制发射机将激光束照射到激光电池上,激光电池将激光光能转换成电能,经过电源管理系统获得电能输入,驱动目标动力装置及电子设备或对目标上的储能装置充电。

2　激光无线能量传输技术国内外研究进展

2.1　激光无线能量传输技术国外研究进展

LWPT 始于 1968 年美国 GLASER 博士提出的空间太阳能电站构想。设想在地球同步轨道(geosynchronous orbit,GEO)上搭建空间太阳能电站,从而在太空收集稳定的、高强度的太阳辐射,再将其转换为激光或者微波的形式进行传输,在地面上建立的能量接收系统,将接收到的激光或者微波形式的能量转换为电能后进行储存及后续利用。

2004 年,欧洲空间局(European Space Agency,ESA)对不同的太阳能卫星方案进行了评估,计划进行 LWPT 实验,使用 4 个 10kW Nd: YAG 激光器,光斑直径 1m,传输距离 60000km,到达目标光斑直径 39m,能量密度 34W/m^2。接收端采用 100m^2 的光电池阵列,整体效率 7.1%[1]。图 1 所示是激光太阳能卫星的概念图。

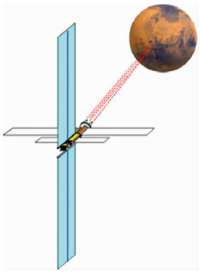

图 1　激光太阳能卫星概念图

2004 年,欧洲光可持续发展战略计划对 GEO 太阳能卫星概念进行研究,见图 2。携带 110.7km^2 太阳电池阵列及太阳光汇聚器件的太阳能卫星,收集 275GW 太阳光能量,经电池阵列转换,产生 53GW 电能,抽运激光器产生激光。入射到面积为 68.9km^2 的地面激光电池接收系统实现光-电转换,最可得到 7.9GW 的电功率[2]。

2004 年,日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency,JAXA)提出在 GEO 轨道上放置太阳光汇聚装置,聚焦太阳光直接抽运 Nd: YAG 激光器

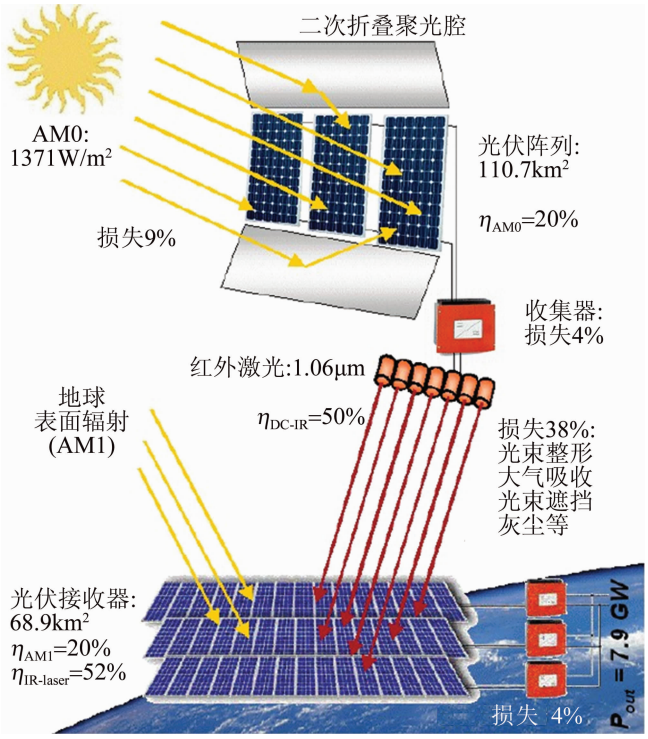

图 2　空间激光产生系统

产生 1GW 激光输出。传输到海上设置的激光电池接收装置,实现光-电转换。利用转换来的电能分解海水制造氢气。预计激光-电的转换效率可达 70%[3]。

2009 年,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory,LLNL)开展空对地 LWPT 研究。设想在近地轨道上,利用直径 70m 超薄高反射率汇聚镜汇聚太阳光能产生激光。同时利用直径 5m 的可折叠充气激光衍射镜,将激光汇聚到激光电池上。该系统每 90min 绕地球一圈。若在地面搭建 10 个激光接收站,每个接收站可持续接收 9min 兆瓦级激光能量,实现单空间太阳能电站为多地面站供电的可能[4]。

1997 年,日本 YUGAMI 等人[5]进行了 LWPT 场地实验,见图 3。发射端选用 CO_2 激光器,功率 25W,通过口径 150mm 离轴抛物面镜进行准直,传输距离 500m,接收端使用 150mm 的离轴抛物面镜进行汇聚,接收激光功率 15W,激光-激光的传输效率 60%;同时测试了 808nm 的激光二极管照射尺寸为 2cm×2cm 的单结 GaAs 电池,激光-电效率为 40%。

2006 年日本 Kinki 大学利用波长 808nm、功率 200W 光纤耦合 LD 为带有光伏电池的风筝和旋翼无人机供能,见图 4。激光器电-光效率为 34.2%,光伏组件由 30 片 4cm×7cm 的 GaAs 芯片组成,激光-电效率为 21%,总的电-光转换效率为 7.2%[6]。

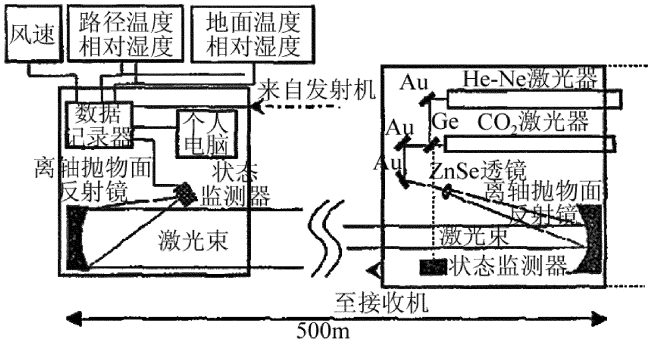

图 3 日本激光无线能量传输的地面实验

图 4 日本 Kinki 大学激光无线供能风筝和旋翼无人机实验

图 5 为日本 JAXA 设计的基于 LWPT 的太阳能卫星[7]。空间中聚光镜将太阳光汇聚到激光器上,激光器把太阳光转换为激光发射到地球,海面上建立激光接收站,利用激光照射海水制氢,收集后供使用。太阳能卫星使用 Nd: YAG 激光器波长为 1.06μm。每个单元使用两面 100m×100m 的聚光镜,产生 10MW 的功率,100 个单元组成一个 1GW 级太阳能卫星。

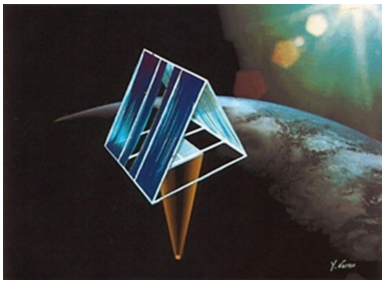

图 5 日本 JAXA 设计的太阳能卫星概念图

俄罗斯研究机构设计了一套小卫星与国际空间站进行 LWPT 的实验系统,传输距离大于 1000m,传输功率大于 1000W,系统兼具激光通信和测量功能[8],如图 6 所示。

随着空间技术的进步,人类对于月球的探索正在逐步推进。图 7 是日本 Kinki 大学 TAKEDA 等人设计的月球 LWPT 冰探测机器人演示图。设计中利用两个

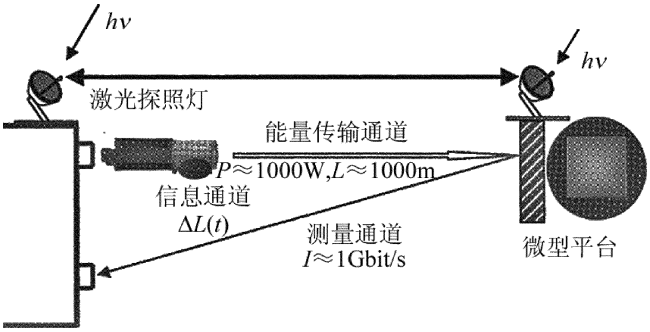

图 6 激光能量传输、通信、测量一体机

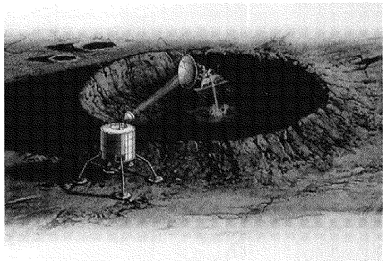

图 7 月球冰探测机器人激光供能设计图

机器人,一个在月球坑外面,利用太阳光获取能量,转换成激光后照射到探测机器人上安装的光电池板,接收激光能量转化为电能。在月球环境下,传输距离至少 5km,接收板尺寸小于 1m[6]。

2005 年,PARISE 等人对月球探测机器人进行了 LWPT 实验[9],如图 8 所示。发射系统采用 200W 的 LD,通过光纤孔径为 400μm、数值孔径为 0.22 的光纤输出,激光接收采用直径 70cm 的电池板。成功地进行了地面演示。

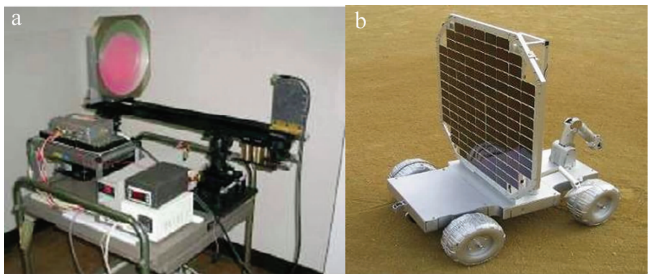

图 8 激光供能月球探测机器人原型系统

a—激光发射系统 b—月球探测机器人

图 9 是美国人设计的无线充电电动汽车示意图。路边每隔特定距离竖立一个无线充电系统,当电动汽车电量不足时,向无线充电网络发送信号,网络通过该信号确定电动汽车位置和移动情况,激活距离最近无线充电单元追踪电动汽车,通过微波或激光方式向汽车充电[9]。

2007 年,美国加州大学圣马科斯分校研究人员使用能量球作为接收装置进行了 LWPT 实验[10],如图 10

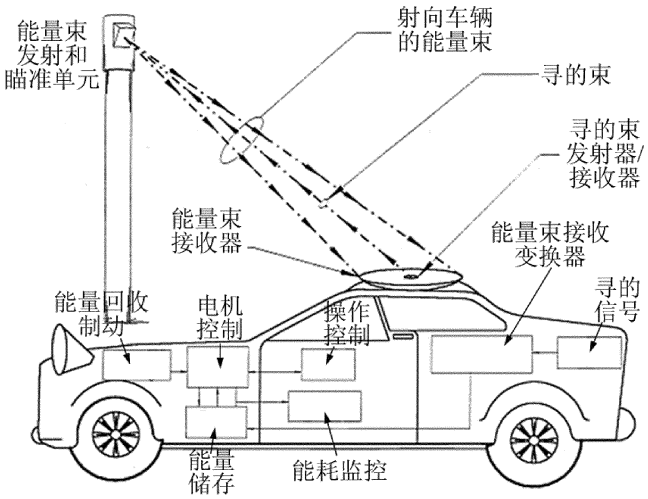

图 9　电动汽车无线充电示意图

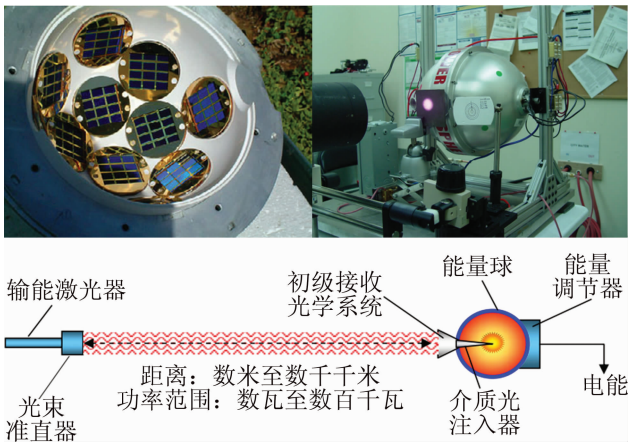

图 10　光伏眼及其工作原理

所示。光伏电池位于能量球内壁，入射到能量球内的激光在球内多次反射而不会溢出，提高了光-电效率。实验中选用 Nd: YAG 激光器，功率为 160W，传输距离为 3m，从能量球输出功率为 18.96W[11]。

美国宇航局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）也开展了 LWPT 研究。2003 年 9 月进行了模型飞机激光供能飞行实验，如图 11 所示。实验中使用 1kW 红外激光器，航模马达功率为 6W，只要接收到激光照射就可持续飞行。首次实现了仅靠激光供能的模型飞机飞行演示[12]。

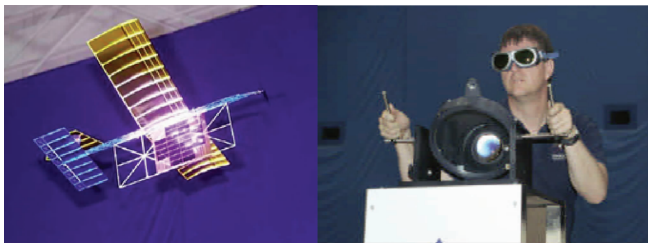

图 11　激光供能航模飞机

NASA 自 2005 年起开始举办 LWPT 太空电梯竞赛。每个参赛队制作一个机械装置（电梯），沿着垂直的绳子往上运动，能源部分位于地面，通过 LWPT 供给电梯。使用的激光器单个 10mm bar 条功率大于 100W，效率大于 60%，总功率 2.5kW ~ 10kW，波长 800nm ~ 980nm，发散角压缩至 1mrad[13]。2009 年，Laser Motive 代表队实现了太空电梯爬升高度 1km 的目标，平均速度为 3.9m/s，图 12 是比赛中的“电梯”。

图 12　NASA 太空电梯比赛

2002 年，SLEINSIEK 等人进行了地面 LWPT 实验[14]。用 Nd: YAG 全固态激光器，倍频输出 532nm 绿光驱动装有光伏电池的小车，扩束后光束直径 30mm ~ 50mm，输出功率为 5W；光电池中心装有角反射镜，实现追踪功能，光电池效率 25%，见图 13。

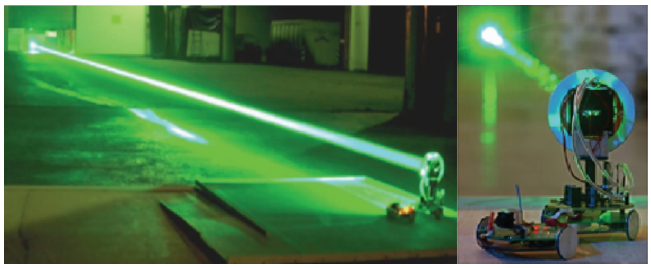

图 13　德国地面激光无线能量传输驱动小车实验

2009 年，美国激光动力公司完成激光输能 PELICAN 四旋翼直升机飞行试验，创造了悬停飞行 12.5h 的记录[15]，见图 14。2012 年，该公司与洛・马公司合作，在美军特种作战部队装备的小型无人机 Stalker 加装激光输能系统，完成了室内和野外激光输能飞行试验，取得了里程碑成果[16]，见图 15。

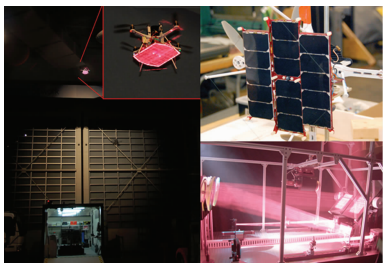

图 14　激光输能 PELICAN 四旋翼无人机飞行试验

激光驱动公司已经完成了一套完整的便携式 LWPT 系统，可将几百瓦功率传送到 1km 外的移动飞行

图 15 “阔步者”无人机激光无线供能实验

器中。而当距离更近时，传输功率可超过 1000W。2009 年 11 月，在美国爱德华空军基地该系统已经反复试验，达到 5 级技术成熟度（technology readiness level5，TRL5），在封装和集成上只需稍作改进，便可达到 TRL6，进入实际应用[17-18]。

2013 年，美国海军实验室在室内实现了 40m LWPT 无人机飞行试验，如图 16 所示。采用 2kW 的单模光纤激光器（1.07μm），激光电池采用 Spectrolab Inc. 研发的 InGaAs 激光电池阵列。单个芯片效率 40% ~50%，电池阵列可提供 160W ~190W 电力。使用了光学跟踪系统，将激光束自动定位在激光电池阵列中心[19]。

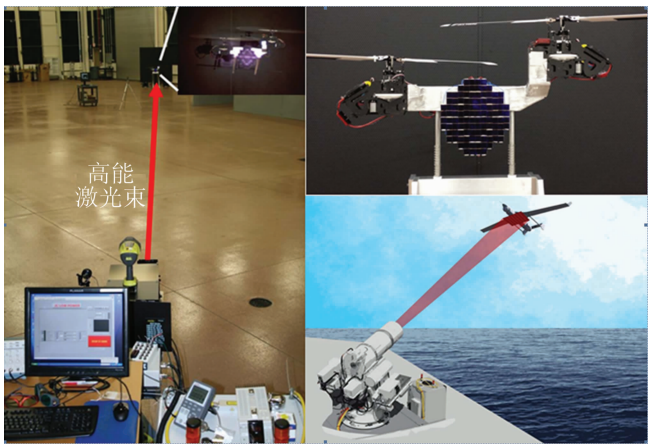

图 16 美国海军实验室无人机 LWPT 实验

2.2 激光无线能量传输国内研究进展

国内开展 LWPT 研究的主要单位包括北京理工大学、山东航天电子技术研究所、南京航空航天大学、解放军装备指挥学院、军械学院等。

2013 年，北京理工大学 HE 等人设计了 LWPT 地面实验系统，见图 17。理论分析了激光波长、光电转换材料等关键参量对传输效率的影响，分别用 793nm 和 808nm 光纤耦合 LD，进行了 10m LWPT 实验。结果表明，以 793nm 激光为光源、GaAs 电池的 LWPT 系统优势明显，光-电转换效率高达 48%，系统总的直流到直流（direct current to direct current，DC-DC）传输效率 18%[20]。同年 HE 等人又演示了高功率激光传输系

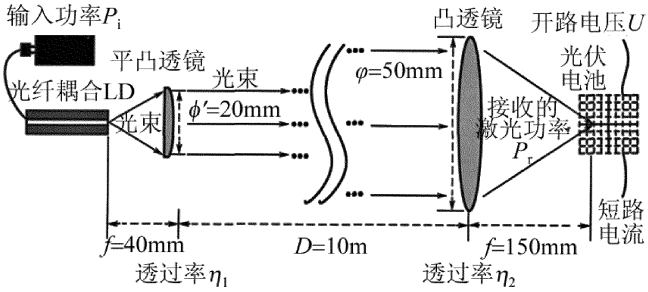

图 17 10m 激光能量传输系统原理图

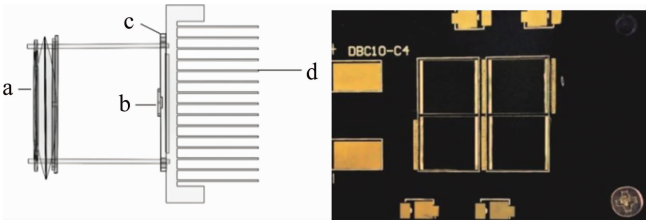

图 18 激光无线能量传输电池阵列

统，设计了效率达 42.3% 的多片 GaAs 阵列，见图 18。激光输入功率 24W 时，可实现 10W 的电功率输出，测量了阵列效率对波长、激光功率和温度的关系[21]。

2014 年，HE 等人采用 793nm、功率 24W 的半导体激光器和 GaAs 电池，进行了距离 100m 的 LWPT 实验，见图 19。自行设计了基于 LabVIEW 的 LWPT 效率测试软件。激光发射功率为 24W（功率密度为 6kW/m^2）时，光-电效率为 40.4%，输出电压为 4V，整体电-电效率为 11.6%[22]。

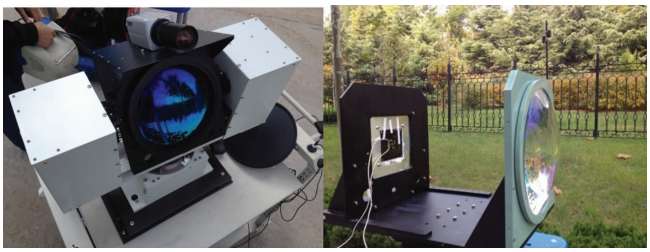

图 19 百米激光无线能量传输实验

2015 年，北京理工大学 ZHANG 等人建立激光电池的单指数等效模型，推导出激光电池的伏安特性函数、产生电流、复合电流及扩散电流的表达公式，将激光电池的 P-N 结参量与输出参量联系起来。对圆对称激光电池进行建模仿真，计算出圆对称 GaAs 激光电池在基模激光照射下光-电转换效率的理论极限[23]。实验中研究了入射激光波长、激光功率、激光光斑大小及激光电池工作温度对电池光-电转换效率及输出参量的影响。实验表明，GaAs 激光电池在 2.48W 的793nm 激光照射下，获得了高达 50.33% 的光-电转换效率[24]。

2013 年，山东航天电子技术研究所的 LI 和 SHI

等人综述了 LWPT 技术的国内外进展及应用,分析了其优势及关键技术[25];根据分布式集群飞行器系统能量分配需求,建立了系统框架模型,设计了系统各组成模块,进行了仿真,获得了理想的光-电转换效率[26-27]。2014 年 10 月,山东航天电子技术研究所进行了两飞艇之间的 LWPT 动态试验,见图 20。两飞艇距离为 50m ~ 100m,速率为 5m/s;输入电压为 22V,输入电流为 4A,输入功率为 88W;最大接收功率为 13.43W,最大传输效率为 16.08%[28]。2015 年,山东航天电子研究所 LI 等人总结了 LWPT 技术的应用场景,分析了 LWPT 技术在航天方面的应用需求、系统组成和关键技术,展望了发展趋势[29]。同年,ZHANG 等人分析 LWPT 中影响接收装置效率的因素,结合光电池最优布局和最大功率跟踪技术,提出一种转换效率高达 29.6%、且不受负载阻抗影响的 LWPT 接收装置[30],见图 21。

图 20　飞艇之间动态 LWPT 实验

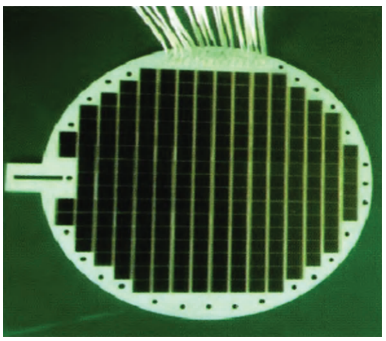

图 21　光电池板实物图

2015 年,SHI 设计了一种基于激光相控阵技术的多光束激光发射天线及 LWPT 系统,对 LWPT 在轨应用具有参考价值[31]。LI 提出了一种可用于空间太阳能电站的 LWPT 系统[32]。WU 研究了多光束传输的 LWPT 系统协同捕获、瞄准与跟踪方法,分析了单终端多光束系统和多终端多光束系统的实现方法及构成,针对单光束、7 光束和 9 光束发射系统的目标重构光斑进行仿真,结果表明,精确的多光束协同 ATP 系统可以实现光束重构,能量密度和分布得到改善[33]。

2012 年,南京航空航天大学 YANG 等人提出激光照射下理想电池转换效率的计算方法,推导出解析表达式,实验中测量了激光波长、激光强度、环境温度等因素对转换效率的影响。结果表明,单晶硅电池对单色激光的光-电转换效率相对太阳光明显提高,最高可达 27.7%[34]。2014 年,QIAO 优化设计了 LWPT 系统,实验中研究单结 GaAs 光电池当 808nm 激光以 0.23W/cm^2 的功率密度照射时,转换效率为 61.2%,光功率密度增强到 1.15W/cm^2 时,效率保持在 40% 以上。使用 30mm × 40mm 光电池产生了 1W 以上输出功率[35]。2015 年,ZHOU 等人研究了 LD 在连续和脉冲模式两种驱动模式下,注入电流对 LD 电光转换效率的影响[36-37]。2016 年,ZHOU 等人研究了高斯光束对激光电池阵列转换效率的影响,提出使用不同的光伏(photovoltaic,PV)配置减少高斯激光束引起损耗的方法[38]。JIANG 等人研究了中小型侦察无人机 LWPT 系统实现功率和信息同时传输技术[39],搭建原理样机验证了可行性[40]。

2014 年,解放军装备指挥学院 YANG 等人研究了模块化航天器的天基激光输能技术[41]。针对同轨道平面两星之间激光能量传输时的姿态指向控制问题,基于反射法提出一种自适应控制器设计方法[42]。2015 年,CUI 等人研究了一定激光功率密度下 GaAs 和 Si 电池在不同温度下的伏安特性,以及短路电流、开路电压、匹配负载、最大输出功率、填充因子、转换效率随电池温度的变化规律,并给出定量表达式[43]。2016 年,CUI 等人实验研究了高斯光束对光电池输出的影响,证明辐射形状排列可以获得更高输出[44]。分析了激光辐照条件下最佳激光波长与光电材料禁带宽度的关系,得到了光电池各类输出性能参量的计算方法[45]。

2015 年,石家庄军械学院 LIU 等人采用 940nm 激光辐照单晶 Si 光电池,研究了光电池输出特性随激光强度和电池温度的变化规律[46]。建立了光伏电池的动态热模型,分析了光伏电池温度与激光功率、风速、环境温度的关系[47]。2016 年,HUA 等人采用单结 GaAs 光电池和 808nmLD,实验测试了光电池性能参量与激光功率和电池温度的关系[48]。

此外,国防科技大学、四川大学、中国科学院力学研究所等单位也对 LWPT 技术进行了一些理论和实验研究。

3　LWPT 面临的技术挑战

LWPT 技术涉及激光技术、大气效应、光伏技术、自动目标识别(automatic target recognition,ATR)技术以及电源管理系统等多个技术领域,是一项涉及范围广、技术带动性强的新兴技术。

LWPT 技术的核心是效率,主要影响因素是激光器的效率和光束质量、传输效率和光-电池的效率。激

光器的效率和光束质量是激光工作者持之以恒的追求,800nm ~ 950nm LD 是目前电-光效率最高(60%)的激光器,但光束质量较低,适用于近程 LWPT,远程 LWPT 可能考虑光纤激光器。大气传输效率在近红外波段,无论是 800nm ~ 950nm LD,还是 Nd: YAG 激光器,透过率在一般距离均较高,空间 LWPT 则不需考虑这个问题。目前成熟的光电池基于 Si 和 GaAs 两种材料,GaAs 光电转换效率明显高于 Si 电池,虽然价格昂贵,但与整个系统造价相比尚可接受。

4 LWPT 需进一步研究的课题

4.1 LWPT 系统建模与仿真

整体效率是衡量 LWPT 系统性能的最重要参量,因此建立 LWPT 系统的数学模型,对系统整体效率进行设计和优化,分析、评价和模拟仿真系统效率,指导系统设计,至关重要。

4.2 高功率激光非相干组束拓扑与远场匀化技术

在远距离 LWPT 系统中,需要研究高功率激光非相干组束拓扑技术,采用非相干叠加的方法对远场光斑分布进行匀化。

4.3 LWPT 系统中大气干扰效应与对策研究

对高空目标进行供能时,一般情况下激光处于斜程传输状态,大气折射率沿传输路径非均匀变化,有必要对激光传能中斜程大气的干扰特性进行充分研究。

4.4 LWPT 系统加速充电技术

处于动态工作状态的远程 LWPT 系统,激光束需要持续性照射到电池表面才能提供系统足够的能量。可以采用快速充电的策略,提高系统的充电速度。

4.5 LWPT 系统动态闭环充电调控技术研究

针对不同负载情况,对系统中的瞬时功率进行闭环控制,使得激光器与光伏阵列都处于最佳工作点,从而保证系统效率最大化。

4.6 激光电池的热特性分析与管理

有必要对电池温度与输出效率进行理论研究和仿真优化。在大规模激光阵列的应用中,电池的热特性分析和管理是核心问题之一。

5 结束语

综上所述,LWPT 技术提供了一种通过空间传输能量的新途径,在空间和地面都存在多种潜在的应用,其中一些已经具备技术上的可行性,找到适合 LWPT 技术应用的场景是促进其应用的关键。

LWPT 技术涉及激光技术、光伏技术、ATR 技术以及电源管理系统等多项技术领域,涉及范围较广、技术带动性强。

参 考 文 献

[1] COUGNET C, SEIN E, CELESTE A, *et al*. Solar power satellites for space exploration and applications[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Solar Power from Space-SPS 2004, Together with the 5th International Conference on Wireless Power Transmission. Granada, Spain: Solar Power from Space, 2004: 151-158.

[2] HENDRIKS C, GEURDER N, VIEBAHN P, *et al*. Solar power from space: European strategy in the light of sustainable development-Phase 1: Earth and space based power generation systems[J/OL]. (2004-03-20)[2019-06-01]. http://www. esa. int/gsp/ACT/doc/POW/ACT-RPT-NRG-0412-SPS_EcoFys_FinalReport. pdf.

[3] MORI M, KAGAWA H, NAGAYAMA H, *et al*. Current status of study on hydrogen production with space solar power systems (SSPS)[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Solar Power from Space-SPS 2004, Together with the 5th International Conference on Wireless Power Transmission. Granada, Spain: Solar Power from Space, 2004: 3-11.

[4] RUBENCHIK A M, PARKER J M, BEACH R J, *et al*. Solar power beaming: From space to earth[R]. Livermore, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2009: LLNL-TR-412782.

[5] YUGAMI H, KANAMORI Y, ARASHI H, *et al*. Field experiment of laser energy transmission and laser to electric conversion[C]//IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No. 97CH6203). New York, USA: IEEE, 1997: 625-630.

[6] KAWASHIMA N, TAKEDA K. Laser energy transmission for a wireless energy supply to robots[M]. Rijeka, Croatia, Europe: Robotics and Automation in Construction, 2008: 374-380.

[7] MORI M, KAGAWA H, SAITO Y. Summary of studies on space solar power systems of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)[J]. Acta Astronautica, 2006, 59(1/5): 132-138.

[8] KARE J T. Laser power beaming infrastructure for space power and propulsion[J]. Proceedings of the SPIE, 2006, 6222: 62220W.

[9] PARISE R J. Future all-electric transportation communication and recharging via wireless power beam[J]. Optical Wireless Communications Ⅲ, 2001, 4214: 171-179.

[10] ORTABASI U, FRIEDMAN H W. Powersphere: A novel photovoltaic cavity converter using low bandgap TPV cells for efficient conversion of high power laser beams to electricity[J]. AIP Conference Proceedings, 2004, 738(1): 142-152.

[11] ORTABASI U, FRIEDMAN H. Powersphere: A photovoltaic cavity converter for wireless power transmission using high power lasers[C]//2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference. New York, USA: IEEE, 2006: 126-129.

[12] BLACKWELL T. Recent demonstrations of laser power beaming at DFRC and MSFC[J]. AIP Conference Proceedings, 2005, 766(1): 73-85.

[13] TREUSCH G, KOENNING T, SHELEF B. High-power diode lasers boost power-beaming competition[J]. Laser Focus World, 2008, 44(3): 75-77.

[14] SLEINSIEK F, FOTH W P, WEBER K H, *et al*. Wireless power transmission experiment as an early contribution to planetary explera-

tion missions [C]// International Astronautical Congress of the International Astronautical Fede Ration. Bremen, Germany: International Academy of Astronautics, and International Institute of Space Law, 2003: 169-176.

[15] NUGENT T, KARE J, BASHFORD D, *et al*. 12-hour hover: Flight demonstration of a laserpowered quadrocopter [C]//AUVSI Unmanned Systems North America. Washington DC, USA: Curran Associates Inc., 2011: 906-924.

[16] ZHANG N, XU Z, ZHU X, *et al*. Laser propulsion technology[J]. Infrared & Laser Engineering, 2011, 40(6):1025-1037(in Chinese).

[17] YANG Sh F, LIN L X. Key technology and application prospect of laser beam driving[J]. Laser & Infrared, 2014,44(5):477-481(in Chinese).

[18] NORRIS G. UAV Demonstrates utility of laser power[J]. International Aviation,2013(1):50-51(in Chinese).

[19] SPRANGLE P, HAFIZI B, TING A, *et al*. High-power lasers for directed-energy applications[J]. Applied Optics, 2015, 54(31): F201.

[20] HE T, YANG S H, ZHANG H Y, *et al*. High-efficiency laser wireless energy transmission and conversion experiment [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(3): 0317001 (in Chinese).

[21] HE T, ZHANG H Y, YANG S H, *et al*. Efficient monolithic multi-cell GaAs converter for high power space laser transmission[J]. Chinese Physics Letters,2014(10):65-69.

[22] HE T, YANG S H, ZHANG H Y, *et al*. High-power high-efficiency laser power transmission at 100m using optimized multi-cell GaAs converter[J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(10):104203.

[23] ZHANG Y Ch, ZHAO C M, YANG S H, *et al*. Evaluation of impacts of laser parameters on laser cell efficiencies[J]. Proceedings of the SPIE,2015, 9619: 961904.

[24] ZHANG Y Ch. Theoretical and experimental research on improving laser cell efficiency [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016:51-60 (in Chinese).

[25] LI Zh Y, SHI D L, SHI J Sh, *et al*. Laser-based wireless power transmission technology [J]. Space Electronic Technology, 2013 (3):71-76(in Chinese).

[26] SHI D L, LI Zh Y, WU Sh Ch, *et al*. Mechanism analysis and simulation of laser wireless power transmission[J]. Space Electronics, 2013(3): 66-70(in Chinese).

[27] SHI D L, LI Zh Y, WU Sh Ch, *et al*. Scheme of laser wireless energy transmission system between module spacecraft [J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(5): 67-73(in Chinese).

[28] SHEN D, ZHANG L, MA H, *et al*. Research on wireless power transmission system between satellites [C]//2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). New York, USA: IEEE, 2016: 1-4.

[29] LI X Y, WU Sh Ch, LI X F. Application and development trend of laser wireless energy transmission technology[J]. Spacecraft Engineering,2015,24(1):1-7(in Chinese).

[30] ZHANG J D, GUO Ch H, YU Y F. Research on laser wireless energy transmission and receiver[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24 (1):13-17(in Chinese).

[31] SHEN J Sh, CHENG K, MA B, *et al*. Application of laser wireless energy transmission in orbit[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24 (1): 25-30(in Chinese).

[32] LI Zh Y, ZHANG J D, HUANG X J. Research on laser wireless energy transmission technology of space solar power station[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(1): 31-37(in Chinese).

[33] WU Sh Ch,ZHANG S J, CHANG Zh K, *et al*. Research on multi-beam collaborative acquisition targeting and tracking technology for high power laser energy transmission[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(1):18-24(in Chinese).

[34] YANG P, YANG Y N. Research on conversion efficiency of laser irradiated single crystal silicon cell[J]. Laser Technology, 2012,36 (5): 696-699(in Chinese).

[35] QIAO L, YANG Y N. Experimental study on laser wireless energy transmission efficiency[J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 590-594(in Chinese).

[36] ZHOU W Y, JIN K. Efficiency optimization inject current characteristic of laser diode for wireless power transmission[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). New York, USA:IEEE, 2015: 3082-3086.

[37] ZHOU W Y, JIN K. Efficiency evaluation of laser diode in different driving modes for wireless power transmission[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2015, 30(11):6237-6244.

[38] ZHOU W Y, JIN K. Optimal photovoltaic array configuration under Gaussian laser beam condition for wireless power transmission[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(5): 3662-3672.

[39] JIANG L, JIN K, ZHOU W Y. A semiconductor laser driving power source for dual transmission of power information[J]. Transactions of Electrical Engineering, 2016, 31(6): 118-125(in Chinese).

[40] JIANG L. Research on a semiconductor laser driving power source for dual transmission of power information [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015:44-45(in Chinese).

[41] YANG Y W, LI X J. Research on laser energy transfer technology based on separation module spacecraft[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(2):126-130(in Chinese).

[42] YANG Y W, HUANG Y, LI X J, *et al*. Design of adaptive controller for inter-satellite laser energy transfer attitude[J]. Chinese Space Science and Technology, 2014, 34(5):1-9(in Chinese).

[43] CUI X Y, HONG Y J, JIN X. Experimental study on temperature characteristics of photovoltaic cells under laser irradiation [J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2015, 32(5): 515-520(in Chinese).

[44] CUI X Y, HONG Y J, JIN X. Experimental study on the influence of Gaussian beam on photovoltaic cell output[J]. Ordnance Industry Automation, 2016(4): 67-71(in Chinese).

[45] CUI X Y, HONG Y J, JIN X. Study on the ultimate energy conversion efficiency of photovoltaic cells under laser irradiation[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(4): 406-411(in Chinese).

[46] LIU X G, HUA W Sh, LIU X. Experimental investigations of laser intensity and temperature dependence of single crystal silicon photovoltaic cell parameters [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015,42 (8):0802011.

[47] LIU X, HUA W, GUO T. Dynamic thermal model of photovoltaic cell illuminated by laser beam[J]. Proceedings of the SPIE, 2015, 9532: 95322E.

[48] HUA W Sh, LIU X G, ZHANG D M. Output characteristics of laser irradiated single-junction GaAs photovoltaic cells[J]. Laser and Infrared, 2016, 46(12): 1463-1466 (in Chinese).