

激光无线能量传输研究进展

李巍, 吴凌远, 王伟平

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 激光无线能量传输(LWPT)技术具有传输距离长、功率密度高、转换效率高以及无需能量传输线的优势,在空间飞行器、无人机以及空间太阳能电站等方面具有潜在的应用前景。随着激光以及光伏电池技术的进一步发展,LWPT技术的可行性大大提高。介绍了LWPT技术的发展现状和趋势,分析了LWPT系统需要解决的关键技术以及激光辐照下光伏器件的响应特性,针对高功率密度、特定波长的激光专门设计并优化光电转换器件,提高光伏电池的转换效率,为LWPT技术的实际应用提供支撑。

关键词 激光光学; 激光无线能量传输; 激光效应; 光伏电池; 能量转换效率

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.020008

Research Progress of Laser Wireless Power Transmission

Li Wei, Wu Lingyuan, Wang Weiping

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Laser wireless power transmission (LWPT) technology has advantages such as long transmission, high power density, high conversion efficiency and dispense with energy transmission lines, and it has potential application prospects in the spacecraft, unmanned aerial vehicle, space solar power station and so on. With the technology development of laser and photovoltaic cell, the feasibility of LWPT technology is greatly enhanced. We present the development status and tendency of LWPT technology and analyze the key technologies of LWPT system and the response characteristics of the photovoltaic cell under laser illumination. We design and optimize optoelectronic conversion devices for high power density and specific wavelength laser to improve the conversion efficiency of photovoltaic cells, which can support the practical application of LWPT technology.

Key words laser optics; laser wireless power transmission; laser effect; photovoltaic cell; energy conversion efficiency

OCIS codes 140.3460; 350.4600; 140.3300; 350.6050

1 引言

激光无线能量传输(LWPT)不使用能量传输线,而以激光作为能量传输载体,激光具有优异的方向性和高功率密度,可为目标设备提供能量,使其正常工作。1968年美国Glaser^[1]提出LWPT的概念,其目的是在地球近地轨道或同步轨道上建立空间太阳能电站,将太阳光转化为激光或者微波传输至地面,并由建立在地面的接收站进行接收和能量

转换,最终将光能转化为电能并进行存储和应用。相比于传统的能量传输方法,使用LWPT具有传输距离远、功率密度高以及转换效率高等优势。LWPT不仅应用于太阳能电站,在空间飞行器、太空基地、无人机、机器人等的供能方面也有着广泛的应用。例如,LWPT可为处于背阴面的卫星供能、为飞行器提供变换轨道的动力、为长航时的无人机供电、为极端地区如核泄漏区工作的机器人供能以及在月球夜幕降临时给月球基地供能。本文主要介

收稿日期: 2017-07-17; 收到修改稿日期: 2017-08-23

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光重点实验室基金(HEL2015-09)

作者简介: 李巍(1994—),男,硕士研究生,主要从事激光应用技术方面的研究。E-mail: vleeoftrot@outlook.com

导师简介: 王伟平(1970—),男,博士,研究员,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: wwpwzc@yeah.net(通信联系人)

介绍了 LWPT 技术的发展现状及趋势,指明了系统组成以及需要解决的关键技术,分析了光伏器件在激光照射下的输出行为和特性。

2 LWPT 技术的研究现状与发展趋势

2004 年的欧洲光可持续发展计划对空间太阳能电站进行了整体设计^[2],如图 1 所示。通过在空间中使用光伏器件来接收能量密度为 $1371 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的太阳光,即大气光学质量为零的太阳光(AM0),并进行光电转换,进而驱动激光器。所设计的激光器的能量转换效率 $\eta_{\text{DC-IR}} = 50\%$,激光经过大气层传输后能量损失了 38%。在地面使用光伏器件接收激光并进行光电转换,能量转换效率 $\eta_{\text{IR-laser}} = 52\%$ 。此外,地面上的光伏器件还可接收直射至地面的太阳光,即大气光学质量为 1 的太阳光(AM1),其光电转换的能量转换效率 $\eta_{\text{AM1}} = 20\%$,最终,该电站的输出功率 $P_{\text{out}} = 7.9 \text{ GW}$ 。

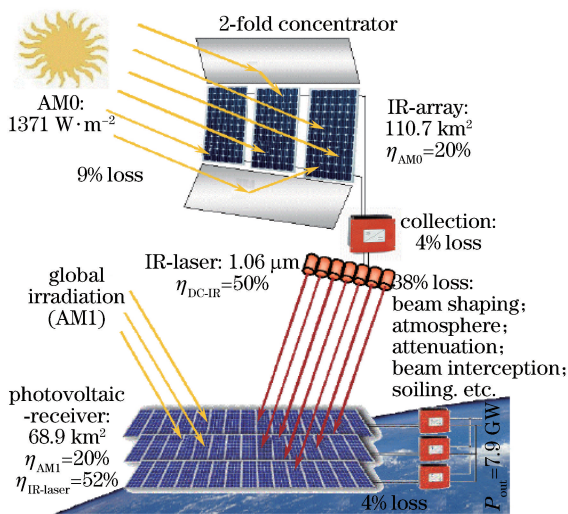


图 1 欧洲光可持续发展计划空间太阳能电站概念图

Fig. 1 Concept map of European light sustainable development space solar power station

2009 年,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)的 Rubenchik 等^[3]提出了一种新的空间太阳能电站的实现方法,并对其工程上需要解决的问题以及可行性进行了详细分析,系统示意图如图 2 所示。在近地轨道上,利用直径为 70 m 的特殊反射镜对太阳光进行反射和会聚,太阳光照射到光电转换效率为 40% 的轻薄光伏电池上会产生电能,驱动光电转换效率为 50% 的激光器产生激光,激光经过一个可折叠的激光衍射镜后会聚到地面上的光伏器件表面,经光电转换后产生电能^[4]。空间中的系统每 90 min 绕地球一圈,如果在地面上建立 10 个

接收站,则每个接收站能够接收到 9 min 的高功率密度的激光能量,从而可实现一个空间太阳能电站为地球上多个地点提供能量。文中还对系统的能量转换效率及重量等问题进行了分析,并指出了今后的发展方向。

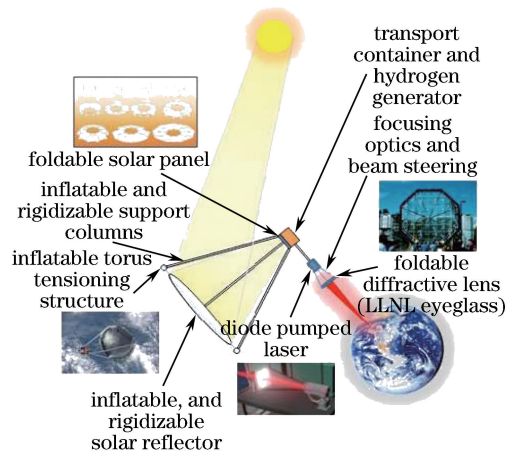


图 2 美国空间太阳能电站概念图

Fig. 2 Concept map of American space solar power station

2017 年,高凤彬等^[5]对空间中向地面发射的激光穿过大气层的过程进行了具体分析。由于此时激光的功率密度极高,大气对激光的吸收^[6]会导致大气温度发生变化,进一步影响大气的折射率,导致激光光束发生变化,影响其功率密度^[7],降低系统的能量传输效率。因此对激光穿过大气层的传输过程进行了详细的理论分析。结果表明:激光功率密度越大,大气的温度以及折射率变化越明显;当激光功率密度为 $1.48 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,大气温度最大可变化 3 K。所以,在激光总功率恒定时,为了使其对大气影响较小,进而使大气对其传输影响较小,要求激光光束口径不能太小,且可以以多光束的形式传输。

受空对地 LWPT 的启发,1989 年 Landis^[8]提出了利用地面上发射的激光对月球基地供能的设想。1991 年 Landis 等^[9-10]提出利用地面上发射的激光对地球同步轨道和近地轨道卫星进行无线能量传输的设想,并进行了理论分析。

20 世纪 90 年代,美国国家航空航天局(NASA)和美国国防部提出了激光的空间供能(SELENE)项目并进行了理论分析^[11-12]。该项目计划在地球上的各个地点建立地面激光发射站,以实现空间中的飞行器全覆盖供能。这就意味着任意一个飞行器在任意时间都能够处于一个或多个激光发射站的覆盖范围内,并能够接收能量,正常工作。SELENE 项目的概念图如图 3 所示,高功率密度的

激光由自由电子激光器产生,经过在真空管中的长距离传输和衍射,其光斑半径能够满足后方光学系统的要求,再利用自适应光学系统对激光进行波前校正^[13],最终激光传输到卫星上的接收器上进行光电转换,完成供能过程。系统中采用的自由电子激光器能够长时间发射高功率密度的激光,虽然体积庞大,但由于其位置在地面,所以影响不大。值得注意的是,当卫星相对于目标激光发射站的天顶角大于 50° 时,大气层厚度会增加,这时可以在激光发射站的正上方固定一个激光反射站,地面上发射的激光经过反射站的反射后再入射到大角度的目标卫星上进行光电转换,这样可以避免激光穿过极厚的大气层,提高了传输效率且减轻了自适应光学系统的负担。激光反射站需要对抗大气风场来保持固定,一般而言采用太阳能即可,但是风力过大时需要地面发射微波对其供能,辅助其进行固定。

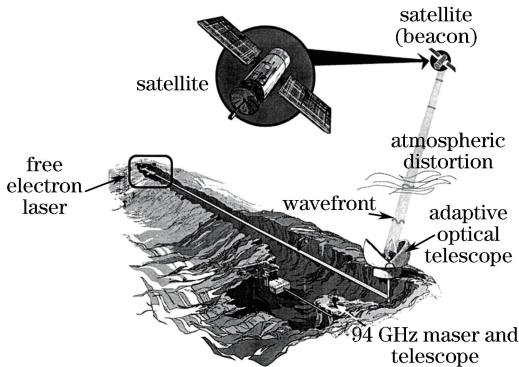


图3 SELENE项目概念图

Fig. 3 Concept map of SELENE project

2017年,日本提出在车辆顶部固定光伏电池,在道路两边采用太阳光抽运激光器接收太阳光并将其直接转化为激光,再将激光照射到车顶的光伏电池上以对车辆进行供能,如图4(b)所示^[14]。相比于车顶的光伏电池直接接收太阳光进行能量转换[图4(a)],经过太阳光抽运激光器转换后的激光能量密度更大,且激光波长与光伏电池材料匹配后能量转换效率更高,所以可减少车辆上的锂电池携带量以减轻重量。设计了一个高效的太阳光抽运激光器和太阳跟踪系统,并进行了实验,发现追踪误差仅为 1 mrad ,且不易受风影响。采用东京的 103 km^2 主干道进行了理论分析,若使用能量转换效率为20%的接收器,且太阳光抽运激光器的能量转换效率为50%,则每天便能产生 $3.82 \times 10^7\text{ kWh}$ 的激光能量。若车顶的光伏电池在该激光波长照射下的能量转换效率为50%,那么每天便能产生

$1.91 \times 10^7\text{ kWh}$ 的电能。1 kWh的电能可使小车运行5 km,所以道路上每天产生的电能能够使一辆小车运行 $9.6 \times 10^7\text{ km}$,综合考虑东京每天的车辆密度以及车辆行驶距离,这些电能可以避免为东京行驶的所有车辆提供额外的能量,如化石燃料燃烧产生的能量,这就可以大大减少二氧化碳(CO_2)的排放。这一设想有利于减轻环境污染,但是其能量利用效率依然较低,且尚且无法进入实用阶段。

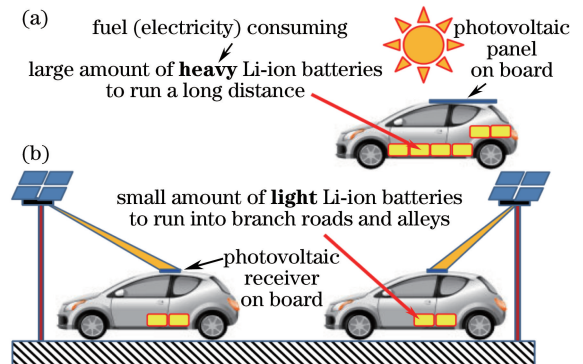


图4 (a)太阳光直接照射车顶光伏电池;(b)激光经太阳光抽运激光器转换后照射车顶光伏电池

Fig. 4 (a) Sunlight illuminates directly at photovoltaic cells on car roof; (b) photovoltaic cells on the car roof illuminated by laser generated from solar-pumped laser

除了概念设计和理论分析之外,美国、日本、德国等还进行了LWPT实验研究,不仅研究了可对机器人和无人机的供能情况,也研究了对空间飞行器和太空电梯等的供能情况。

1997年,Yugami等^[15]进行了地对地的激光无线传能实验。实验中采用 CO_2 激光器发射激光,经过500 m的传输后,到达接收端的能量为出射光能量的60%~65%,在24 h内测量激光的传输效率,发现除了下雪时传输效率会严重下降,其他时间传输效率基本稳定在45%~65%。

2003年Steinsiek等^[16]进行了利用激光为在地面运行的小车无线供能的实验,如图5所示。输出功率为5 W、波长为532 nm的绿光传输30~200 m后,照射到小车上的磷化镓(InGaP)电池板上,驱动小车正常工作,其光电转换效率为25%。电池板中心装有角反射镜,以便在小车运行过程中对小车的位置进行反馈,实现目标追踪。

2005年,美国NASA的Dryden Flight Research Center (DFRC)和Marshall Space Flight Center (MSFC)开展了小型飞行器(图6)激光供能实验^[17]。采用波长为940 nm的固体激光器阵列,在300 W和500 W的输出功率下,对两种不同材料(Si和Ga:In:

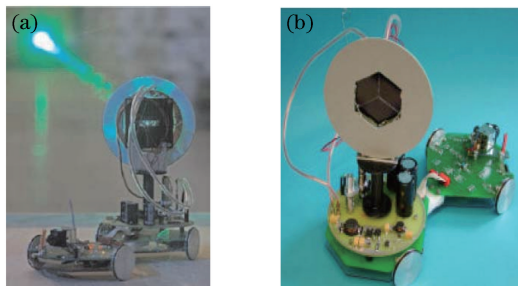


图 5 小车激光供能实验装置。

(a)运行中的小车示意图;(b)小车示意图

Fig. 5 Experimental setup of small car driven by laser.

(a) Diagram of the ongoing small car;

(b) diagram of the small car

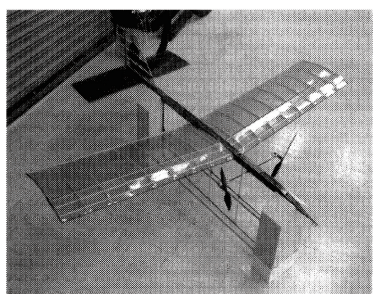


图 6 飞行器实物图

Fig. 6 Picture of aircraft

P_2) 的光伏器件进行测试,实现了室外条件下激光对 15 m 外的小型飞行器的供能,使其长时间续航,实验中飞行器的质量为 255.1 g,速度为 $11.27 \sim 24.15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。该实验包括了激光光源的设计与选择、激光传输系统的设计、光伏器件材料的选择与结构设计、小型飞行器设计以及目标跟踪等,为之后的小型飞行器激光供能研究提供了全面的参考。

Kawashima 等^[18-19]使用激光对电动风筝进行无线能量传输实验,系统模型如图 7 所示。实验中使用波长为 808 nm、功率为 200 W 的半导体激光器,30 个 $4 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$ 的砷化镓(GaAs)光伏器件串并联在一起并安装在电动风筝上作为接收器。电动风筝的长度为 789 mm,宽度为 1360 mm,高度为 560 mm,质量为 800 g,并携带了 600 g 的负载,在 50 m 的高度以 10 m 的直径盘旋了 1 h 并安全降落,测得其平均输出功率为 40 W。

2010 年 NASA 进行了激光驱动太空电梯实验^[20],太空电梯的运行方式类似于普通电梯且往返于地球与太空,目的是为了使人及设备能够更便捷地往返于地球与太空。在地面使用波长为 1030 nm、功率为 8 kW 的半导体激光照射太空电梯上的硅基光伏器件阵列,为了保证在不同距离下照

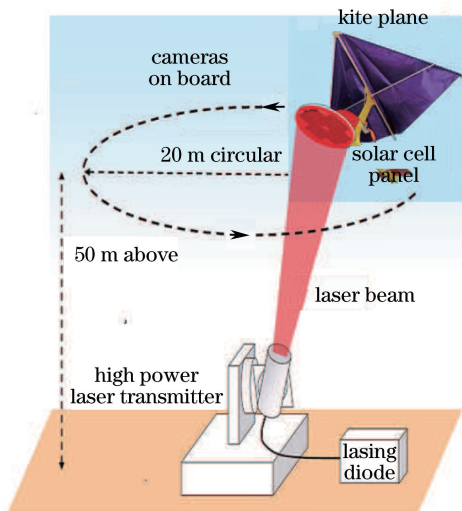


图 7 激光驱动电动风筝系统模型

Fig. 7 System model of electric kite driven by laser

射到光伏器件表面的光斑大小一致,在光伏器件表面安装了变焦透镜组,如图 8 所示。实验最终实现了质量为 50 kg 的太空电梯在 0.1~1.1 km 的高度内以 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度正常运行,且在入射光功率密度为 $20 \sim 30 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,单个光伏器件的光电转换效率达到了 35%。

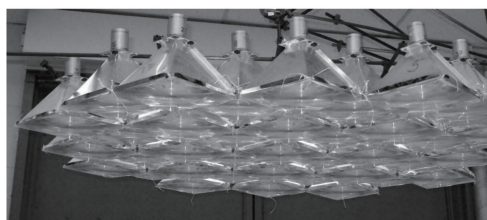


图 8 太空电梯接收系统

Fig. 8 Receiving system of space elevator

2012 年 Smith 等^[21]进行了室外 LWPT 实验。实验中激光器波长、光伏电池材料的选择借鉴了 Brandhorst 等^[22]于 2003 年开展的实验,采用功率为 2.5 kW、波长为 810 nm 的激光器和含 40 片 GaAs 太阳能电池的接收器,激光器与电池的距离为 100 m。实验结果并不令人满意,预计电池板输出功率为 114 W,但实际上仅有 25 W,这主要是因为经过传输并照射到电池板上的激光光束质量较差,且未能将太阳能电池板全覆盖。此次室外实验虽以失败告终,但是其在 LWPT 系统工程上的设计以及实验的具体操作方面具有重要的参考价值,是一次大胆的尝试,也表明了 LWPT 进入实际应用还有很长的路要走。

2012 年洛克希德·马丁公司和 Laser Motive 公司合作,采用激光供能方法成功将 Stalker 无人机系

统的空中续航时间由 2 h 提高到了 48 h 以上^[23]。同时,也实现了对在一个激光发射基地附近盘旋的多个无人机进行能量传输。这次实验对军用、民用长续航无人机进入应用阶段有着很重要的作用。

LWPT 技术目前正朝着高能量传输效率、长传输距离以及高传输功率的方向发展,主要有以下几个方向:

1) 空间太阳能电站的大力发展以及最终进入商业化。空间太阳能电站作为一个 LWPT 技术的重要应用,其优点经过了详细论证,所以美国、日本、加拿大、印度等国家都提出了建立空间太阳能电站的详细发展计划,通过不断解决技术难题,最终进入商业化^[24]。

2) 太阳光抽运激光器应用于 LWPT 系统。太阳光抽运激光器是指抽运光为太阳光的激光器^[25-26],相对于普通激光器,其能量转换的次数更少,且结构比较简单,可靠性较高。太阳光抽运激光器应用于 LWPT 系统,特别是空间太阳能电站时,能够在空间中将太阳光直接转化为激光,降低能量转换次数,提高能量转换效率。

3) 多束不同波长的 LWPT。对于多束波长,在

接收端需采用多结光伏电池或者不同材料的光伏电池进行光电转换^[27],并研究合适的匹配条件使得能量转换效率尽可能大。美国海军对这种方法进行了重点研究^[28-29],其优点是可以减少单个激光器发射激光的功率要求,且可以减少接收端的热量积累,减轻温度控制系统的负担。

4) 利用接收端的热能提高能量利用率。光伏电池接收激光并进行光电转换时,往往会有大量的热量积累,这些热量会降低光伏电池的输出性能^[30-31]。通过研究热-电能量转换技术,如温差发电技术,使这部分能量被利用起来,从而可使 LWPT 系统接收端达到更高的转换效率。

3 LWPT 系统组成及关键子系统

LWPT 系统由激光发射子系统、能量传输控制子系统、激光接收子系统、能源管理子系统以及电源或负载组成,如图 9 所示。由激光器发射的激光通过光束发射以及传输控制系统,传输一定距离后辐照在光电转换器上,光电转换器产生的电能经能源管理模块分配在电源或负载上,实现激光能量的远距离传输、存储或使用的过程。

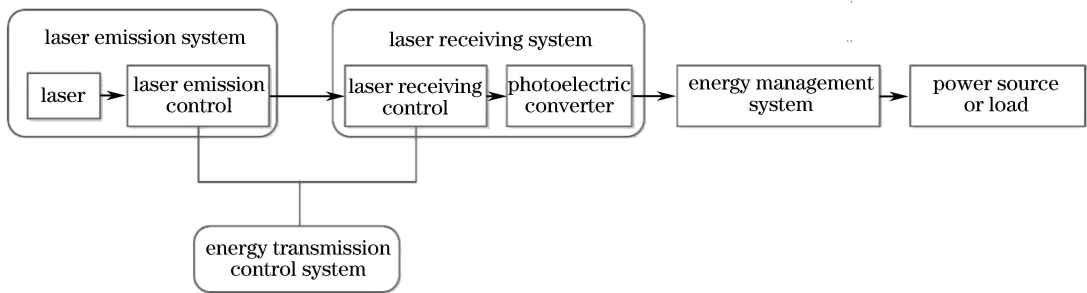


图 9 LWPT 系统示意图

Fig. 9 Schematic of LWPT system

LWPT 系统的关键子系统如下:

1) 高能量转换效率的激光发射系统。激光发射子系统是 LWPT 系统的重要组成部分,其核心为激光器,用于传输能量的激光,最终照射在接收器上。为了保证系统尽可能高的电-光-电能量转换效率,激光器的电光转换效率应尽可能高;由于照射在接收器上的激光光束能量分布对其光电转换效率有一定影响,因此需要激光器发射高光束质量的激光;同时,由于激光的波长以及功率密度对接收器的光电转换效率有较大影响,所以发射的激光波长以及功率密度应与接收器相匹配^[32]。

2) 激光光束质量控制系统。大气的不均匀分布等因素会造成激光波前畸变,使到达接收器上的

激光光束质量变差。一般需采用自适应光学系统^[33-34]并通过实时反馈的激光光束质量来进行补偿调整,使到达接收端的激光光束质量满足要求。自适应光学系统在满足光束质量控制的情况下,应采用尽可能少的光学元件,以减少激光能量的损失。

3) 激光控制跟踪系统。LWPT 系统中,发射器以及接收器的尺寸都比较小,传输距离比较远,且有些情况下接收器或发射器都在移动,为了使得激光能够准确地照射在接收端上,且尽量保证正入射以获得尽可能高的能量转换效率,需要精准的激光光束控制以及跟踪系统。该系统应适用于静态或者动态的接收器,且应保证较高的可靠性。

4) 高能量转换效率的接收系统。接收端进行

光电转换的重要元件一般为光伏电池,在通常的应用情况下,光伏电池可利用太阳光这种清洁能源给某些工作设备供电,但是在 LWPT 应用方面,则采用激光作为光源^[35-36],在激光照射下,需要对其进行优化以使光电转换效率尽可能高。

5) 能源管理系统。激光经过长距离传输后,由光伏电池的光电转换得到的电能需要快速存储下来,并进行合理的分配^[37],使得整个 LWPT 系统的能量利用率尽可能高。给负载供电时,应保证有稳定的输出电压,使得负载能够正常工作。

在 LWPT 系统涉及的光、电、控制等关键系统中,高能量转换效率激光器和光束控制系统是激光定向能应用的共性问题,目前研究较多,技术发展较快,已得到广泛应用。针对特定波长激光的高能量转换效率的接收器是 LWPT 所需的专门技术,目前国内外研究较少,是限制 LWPT 技术应用的主要因素。

4 激光辐照下光伏电池输出特性

LWPT 系统的接收模块中最重要的组成部分是光伏电池,激光辐照下光伏电池响应机制和特性、光电转换效率的研究对 LWPT 的应用研究至关重要,通过研究可以对接收器进行优化设计^[38]。这种优化包括:降低光伏电池表面激光反射率;选择相匹配的激光波长和光电转换器,使激光波长位于材料的光谱响应峰值附近^[39],以达到较高的光电转换效率;选择合适的激光功率密度,使得输出功率和光电转换效率更高,且不会使电池性能下降或损伤;高功率密

度激光辐照会使光伏电池的温度升高,光电转换效率降低,甚至损坏电池,因此需对电池温度进行控制;根据光伏电池自身的特性及激光光束的特性,对光伏电池的结构,如串、并联电路结构等,进行优化设计,使其能量转换效率或者输出功率尽可能大。

2004 年,受聚光光伏电池的启发,Howell 等^[40]设计了一种激光传能接收系统,在直径为 4 mm 的 GaAs 光伏电池前表面,采用口径为 3.7 cm 的透镜进行聚光。实验中激光波长为 830 nm,功率为 0.52 W,测得优化后激光接收系统的光电转换效率大于 56%。

2010 年,美国海军实验室的 Vandyke^[29]模拟计算了波长在 555, 860, 1510 nm 附近变化的三波长激光系统照射下,不同激光功率密度对 InGaP/GaAs/Ge 三结太阳能电池输出特性的影响,其目的是通过计算优化激光波长以及功率密度。计算得到,在输出功率密度均为 $0.049 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,激光照射下的光电转换效率为 51.15%,较太阳光照射下的 36.29% 有相当大的提升。

2013 年 Cuce 等^[30]研究了太阳光功率密度 G 和硅电池温度 T_c 对电池输出的影响,对激光辐照下光伏电池的特性研究有一定参考价值。图 10 所示的实验结果表明,电流(包括光生电流 I_{ph} , 短路电流 I_{sc} 以及最大电流 I_m)均随 G 的增加线性增大;电压(包括开路电压 V_{oc} 和最大电压 V_m)均随 T_c 的升高而减小。从实验结果来看,提升光伏电池性能的方法是降低光伏电池温度或增加光伏电池表面的入射光功率密度。

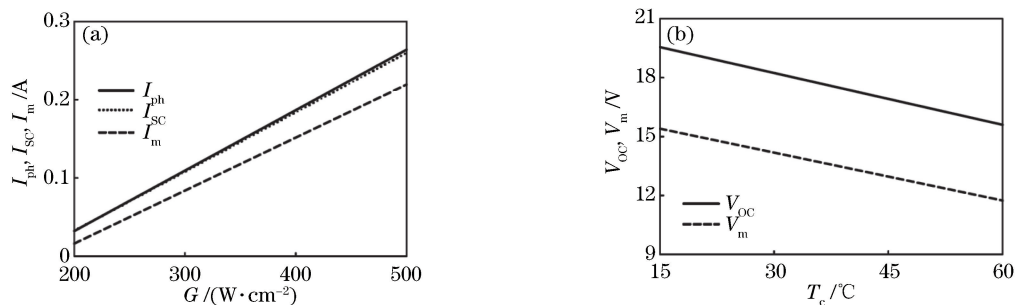


图 10 太阳光功率密度及光电池温度对电池输出特性的影响。(a)光功率密度对电流的影响;(b)光电池温度对电压的影响

Fig. 10 Influences of solar beam power density and photovoltaic cell temperature on output characteristics of cell.

(a) Influence of light power density on current; (b) influence of photovoltaic cell temperature on voltage

2013 年何滔等^[41]设计了一套地面 LWPT 系统,来研究能量的传输效率,并从理论上分析了激光波长、光伏器件材料等对能量传输效率的影响。实验装置中,由光伏电池、半导体制冷片、散热片、散热风扇组成接收装置,光伏电池贴在铜质基底上,利用

半导体制冷片导走基底上的热量,同时利用散热片与散热风扇进行辅助散热。对 GaAs 与 Si 光伏器件在不同激光波长照射下的能量转换效率进行了测量与计算,结果表明 GaAs 光伏器件在 793 nm 波长激光照射下的光-电转换效率最大,为 48%,且系统

整体的电-光-电转换效率达到 18%。

2014 年乔良等^[42]研究了激光波长和激光功率密度对 GaAs 光伏电池能量转换效率的影响。实验分别采用波长 λ 为 532, 671, 808, 980 nm 的激光照射 2 m 外的 GaAs 电池, 并改变激光功率密度, 得到的 GaAs 电池的光电转换效率如图 11 所示。由图可见, 光电转换效率随激光功率密度的变化呈单峰特性, 在波长为 808 nm、功率密度为 $0.23 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的激光照射下, GaAs 光伏电池的光电转换效率达到最大值 61.2%。

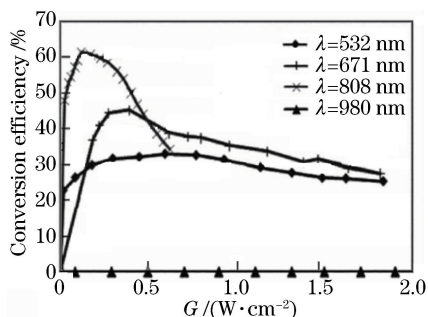


图 11 激光辐照下 GaAs 光伏电池的光电转换效率
Fig. 11 Photoelectric conversion efficiency of GaAs photovoltaic cell under laser illumination

2015 年, Zhang 等^[43]通过理论与实验对波长为 915 nm 的激光照射下单晶硅的输出特性进行了研究, 结果如图 12 所示。在较小功率密度的激光辐照下, 短路电流与输出功率均随激光功率密度的增加而增大, 但是激光功率密度大于 $0.46 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 输出电流、功率均随激光功率密度的增加而减小。同年, Yang 等^[44]也得到了相似的结论。结合实验结果与理论分析表明, 短路电流与开路电压的减小并不是由激光功率密度的增大引起的, 其主要原因是由于温度的增加与串联电阻的增大。实验中采用波长为 980 nm 的激光对 Si 电池进行照射, 最终得到

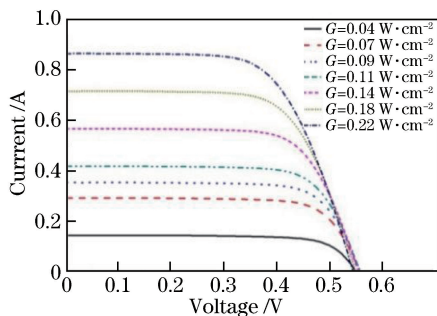


图 12 激光照射下单晶硅电池的输出特性
Fig. 12 Output characteristics of monocrystalline silicon cell under laser illumination

的最大能量转换效率为 26.4%。

2016 年, 陈建东等^[45]提出了一种在任意辐照强度与任意温度下计算光伏电池输出特性的方法。通过对电池电流-电压 ($I-V$) 方程在短路点、开路点以及最大功率点进行求导来构造方程组, 然后根据光伏电池厂家给出的参数, 采用遗传算法求得五参量模型中的各参量, 最终能够通过计算得到光伏电池在任意辐照强度和温度下的输出特性, 且相对误差在 2% 左右, 相对于广泛采用的牛顿迭代算法^[46-48], 其准确性更高。

2015 年刘晓光等^[49-50]针对不均匀激光照射下的串联与并联光伏器件的输出特性进行了理论分析和实验研究, 结果表明, 在分布不均匀的激光照射下, 串联光伏器件的 $I-V$ 曲线存在多峰现象, 且输出功率较小, 能量转换效率低, 并联光伏器件受不均匀激光的影响较小。同时, 根据激光光强的分布, 通过优化电路的连接以及光伏电池的不均匀分组方式, 可以对光伏电池的光电转换效率进行提升。同年, 该团队对激光照射下光伏电池的温度和电路对其输出特性的影响进行了研究^[51], 结果表明: 激光照射下, 光伏电池温度会快速上升, 且其光电转换效率随温度的升高而线性下降, 所以需要采用一定的优化措施来对光伏电池的温度进行控制。

将以上部分重要的结论进行归纳分析, 如表 1 所示。其中, 1 号是 2004 年美国 NASA 聚光光伏电池的研究结果^[40], 2 号是美国 NASA 进行的三波长激光系统照射下三结电池输出特性的理论分析^[29], 3 号是北京理工大学进行的地面实验结果^[41], 4 号是南京航空航天大学开展的波长影响的试探^[42], 5、6 号是北京装备学院与军械工程学院对 Si 电池输出特性的实验研究^[44, 49]。

表 1 光伏电池在激光照射下的能量转换效率

Table 1 Power conversion efficiency of photovoltaic cells under laser illumination

Number	λ /nm	Materials of photovoltaic cell	Power conversion efficiency /%
1	830	GaAs	56.00
2	555, 860, 1510	InGaP/GaAs/Ge	51.15
3	793	GaAs	48.00
4	808	GaAs	61.20
5	980	Si	26.40
6	808	Si	19.30

各文献中的实验条件不完全相同, 所以不能进行严格的比较, 但是通过大体的比较可以看出, Si 电池的能量转换效率远低于 GaAs 电池, 所以在

LWPT 系统中,为达到更高的能量转换效率,使用 GaAs 电池作为接收器件更好。在光伏电池材料一定的情况下,波长对能量转换效率也有较大影响,通过选择与光伏电池材料相匹配的波长,能够大大提高能量转换效率。由于在太阳光照射下,GaAs 电池的能量转化效率为 35%左右,所以使用激光进行照射能够大大提高能量转换效率。从能量转换效率的角度来看,三波长激光系统照射三结电池有一定竞争力,但目前仍在理论验证阶段。4 号实验采用了较为合适的激光波长与光伏电池材料,并采取了较高效的冷却措施,最终的能量转换效率能够达到 61.2%。

目前,针对激光辐照下光伏电池的输出特性研究较多,一般而言,入射在光伏电池表面的激光功率密度主要影响光伏电池的电流参量,且随着功率密度的增加,短路电流线性增加并逐渐趋于饱和。激光波长应与光伏电池材料相匹配,才能达到更大的能量利用效率,所以对于三结电池而言,需要 3 种不同波长的激光进行照射。同时,光伏电池的温度也是影响其输出特性的重要因素,随着温度的增加,能量转换效率会大大降低。最后,光伏电池的内部串、并联等效电阻以及光伏电池阵的串、并联方式对激光辐照下光伏电池的输出特性也有一定影响,且在高功率密度的激光照射下影响更为明显。因此,为提高激光辐照下光伏电池的能量转换效率以及最大功率,使其能够应用在 LWPT 系统中,需要针对以上影响因素进行优化。

5 总 结

LWPT 技术至今还未能进入真正的实用阶段,系统总体能量转换效率较低,尚需要多方面的技术突破。但随着激光器与光伏电池的研究发展,其可行性大大提高,有较好的应用前景。目前 LWPT 技术的研究正朝着高传输功率、高传输效率、长传输距离的方向发展。解决高传输效率是核心问题,这同时需要高电-光转换效率的激光器和高光-电转换效率的接收器,其中光伏电池光-电转换效率的影响占主导地位。目前国内外在 LWPT 方面主要是概念研究和初步的实验研究,一般研究中采用了常规的太阳能电池作为光电转换器件,没有针对高功率密度、特定波长的激光专门设计并优化光电转换器件。下一步应对高功率密度激光辐照下光伏电池响应机理、响应规律及影响能量转换效率的因素开展深入研究,为 LWPT 系统的优化设计提供理论支持。

参 考 文 献

- [1] Glaser P E. Power from the sun: Its future [J]. *Science*, 1968, 162(3856): 857-861.
- [2] Hendriks C, Geurder N, Viebahn P, *et al.* Solar power from space: European strategy in the light of sustainable development[C]. ESA, 2004.
- [3] Rubenchik A M, Parker J M, Beach R J, *et al.* Solar power beaming: From space to earth[R]. [2017-7-17]. <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/372187.pdf>.
- [4] Hyde R A, Dixit S N, Weisberg A H, *et al.* Eyeglass: A very large aperture diffractive space telescope[C]. SPIE, 2002, 4849: 28-39.
- [5] Gao F B, Zhao C M, Guan Z, *et al.* Laser beam propagation process in atmosphere [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 041404.
高凤彬, 赵长明, 关哲, 等. 激光能量穿过大气层的传输过程[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 041404.
- [6] Wei Y, Chen Z H, Du T J, *et al.* Numerical simulation of correction thermal blooming based on deformable mirror eigen mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1101001.
闫伟, 陈志华, 杜太焦, 等. 基于变形镜本征模式法校正大气热晕的数值模拟 [J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1101001.
- [7] 盛裴轩, 毛杰泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [8] Landis G A. Solar power for the lunar night[C]. 9th Biennial SSI/Princeton Conference on Space Manufacturing, 1989: 10-13.
- [9] Landis G A. Space power by ground-based laser illumination[J]. *IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine*, 1991, 6(11): 3-7.
- [10] Olsen L C, Dunham G, Huber D A, *et al.* GaAs solar cells for laser power beaming [C]. Space Photovoltaic Research and Technology Conference, 1991.
- [11] Midorikawa K. Intense laser beams [M]. E. E. Montgomery, 1992: 352
- [12] Bennett H E, Rather J D G, Iú E E M. Free-electron laser power beaming to satellites at China Lake, California [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1994, 341(1/2/3): 124-131.
- [13] Tyson R K. Principles of adaptive optics[M]. London: Academic Press, 1991: 100.

- [14] Motohiro T, Takeda Y, Ito H, *et al.* Concept of the solar-pumped laser-photovoltaics combined system and its application to laser beam power feeding to electric vehicles[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(8S2): 08MA07.
- [15] Yugami H, Kanamori Y, Arashi H, *et al.* Field experiment of laser energy transmission and laser to electric conversion[C]. Energy Conversion Engineering Conference, 1997: 5912538.
- [16] Steinsiek F. Wireless power transmission experiment as an early contribution to planetary exploration missions [C]. 54th International Astronautical Congress, 2003: 169-176.
- [17] Blackwell T. Recent demonstrations of laser power beaming at DFRC and MSFC [C]. AIP Conference Proceedings, 2005: 73-85.
- [18] Kawashima N, Takeda K, Yabe K. Application of the laser energy transmission technology to drive a small airplane[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(s1): S109-S110.
- [19] Takeda K, Kawashima N, Yabe K. Laser energy transmission to a small-unmanned aerial vehicle [J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical & Space Sciences Space Technology Japan, 2008, 7: 27-32.
- [20] Becker D E, Chiang R, Keys C C, *et al.* Photovoltaic-concentrator based power beaming for space elevator application[C]// AIP Conference Proceedings, 2010: 271-281.
- [21] Smith M, Tillotson B, Oliver J, *et al.* Development of a laser power beaming experiment [C]. Photovoltaic Specialists Conference, 2012: 13055706.
- [22] Brandhorst H W, Forester D R. Effects of the atmosphere on laser transmission to GaAs solar cells [C]. 54th International Astronautical Congress, paper # IAC-03-R-3.08, Bremen, Germany, September, 2003.
- [23] Lockheed Martin Aeronautics Company. Lockheed Martin Performs First Ever Outdoor Flight Test Of Laser Powered UAS [DB/OL]. [2012-08-07]. <https://www.edn.com/electronics-products/electronic-product-releases/opto-electronics-products/4391875/Lockheed-Martin-Performs-First-Ever-Outdoor-Flight-Test-Of-Laser-Powered-UAS>.
- [24] 侯欣宾, 王立. 未来能源之路——太空发电站[J]. 国际太空, 2014, 5: 70-79.
- [25] Young C G. A sun-pumped cw one-watt laser[J]. Applied Optics, 1966, 5(6): 993-997.
- [26] Yabe T, Ohkubo T, Uchida S, *et al.* High-efficiency and economical solar-energy-pumped laser with Fresnel lens and chromium codoped laser medium[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(26): 261120.
- [27] Lillington D, Cotal H, Ermer J, *et al.* 32.3% efficient triple junction GaInP/GaAs/Ge concentrator solar cells[C]. Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000: 6776827.
- [28] Guoan C M. Ground-based high energy power beaming in support of spacecraft power requirements [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2006.
- [29] Vandyke J E. Modeling laser effects on multi-junction solar cells using silvaco ATLAS software for spacecraft power beaming applications [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2010.
- [30] Cuce E, Cuce P M, Bali T. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters[J]. Applied Energy, 2013, 111: 374-382.
- [31] Wilcox J R. Solar cell temperature dependent efficiency and very high temperature efficiency limits [D]. West Lafayette: Purdue University, 2013.
- [32] de Young R J, Lee J H, Williams M D, *et al.* Comparison of electrically driven lasers for space power transmission[C]. Scientific and Technical Information Division, 1988: 88.
- [33] Kudryashov A, Samarkin V, Alexandrov A, *et al.* Adaptive optics for high-power laser beam control [C]. Adaptive Optics for Industry and Medicine, 2005, 102: 237-248.
- [34] Lefebvre M J, Taylor G L, Cuellar E L, *et al.* Adaptive optics system for laser-power beam forming [C]. SPIE, 1995, 2376: 200-209.
- [35] D'Amato F X, Berak J M, Shuskus A J. Fabrication and test of an efficient photovoltaic cell for laser optical power transmission [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(3): 258-260.
- [36] Miyakawa H, Hyodo R, Tanaka Y, *et al.* Photovoltaic cell characteristics for high-intensity laser light in fiber optic power transmission systems [C]. Photovoltaic Specialists Conference, 2002: 7755396.
- [37] Ratcliffe E L, Page I, Chami A. Energy management system: US5682949A [P]. (1997-11-04) [2018-01-23]. <https://www.google.com/patents/US5682949>.
- [38] Shan T Q, Qi X L. Design and optimization of GaAs photovoltaic converter for laser power beaming [J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 71: 144-150.

- [39] 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[J]. 2004, 702(1): 367-377.
- [40] Howell J T, O'Neill M J, Fork R L. Advanced receiver/converter experiments for laser wireless power transmission[C]. Solar Power from Space (SPS04) and 5th Wireless Power Transmission (WPT5) Conference, 2004: 187-194.
- [41] He T, Yang S H, Zhang H Y, *et al.* Experiment of space laser energy transmission and conversion with high efficiency[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(3): 0317001.
何滔, 杨苏辉, 张海洋, 等. 高效激光无线能量传输及转换实验[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0317001.
- [42] Qiao L, Yang Y N. Experimental research of laser wireless power transmission efficiency [J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 590-594.
乔良, 杨雁南. 激光无线能量传输效率的实验研究[J]. 激光技术, 2014, 38(5): 590-594.
- [43] Zhang Y, Chen M S, Jiang H M, *et al.* Research of 915 nm laser power beaming to monocrystal silicon solar cells[C]. SPIE, 2015, 9621: 96210I.
- [44] Yang Y W, Zhang D L, Li X J. Research on the mathematical and simulated models of photovoltaic cells for laser power beaming in space [C]. SPIE, 2015, 9449: 944912.
- [45] Chen J D, Huang S H. Simulation of photovoltaic module characteristics in arbitrary solar radiation and temperature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 022303.
陈建东, 黄仕华. 任意辐照强度和温度下的光伏组件输出特性模拟仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 022303.
- [46] Mellit A, Benganem M, Kalogirou S A. Modeling and simulation of a stand-alone photovoltaic system using an adaptive artificial neural network: Proposition for a new sizing procedure[J]. Renewable Energy, 2007, 32(2): 285-313.
- [47] Ma T, Yang H X, Lu L. Development of a model to simulate the performance characteristics of crystalline silicon photovoltaic modules/strings/arrays[J]. Solar Energy, 2014, 100: 31-41.
- [48] Brano V L, Orioli A, Ciulla G, *et al.* An improved five-parameter model for photovoltaic modules [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(8): 1358-1370.
- [49] Liu X G, Hua W S, Liu X, *et al.* Design of photovoltaic receiver with high circuitry efficiency for laser wireless power transmission system [J]. Laser Journal, 2015, 36(12): 100-103.
刘晓光, 华文深, 刘恂, 等. 激光无线能量传输系统光伏接收器电路效率优化研究[J]. 激光杂志, 2015, 36(12): 100-103.
- [50] Liu X G, Hua W S, Liu X, *et al.* Methods to improve efficiency of photovoltaic receiver for laser powered unmanned aerial vehicle [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3): 0306002.
刘晓光, 华文深, 刘恂, 等. 激光供能无人机光伏接收器效率优化方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0306002.
- [51] Hua W S, Liu X G, Zhang D M. Output characteristics of single-junction GaAs photovoltaic cell irradiated by laser[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(12): 1463-1466.
华文深, 刘晓光, 张大铭. 激光辐照单结砷化镓光伏电池的输出生特性[J]. 激光与红外, 2016, 46(12): 1463-1466.