

文章编号: 1001-3806(2014)05-0590-05

激光无线能量传输效率的实验研究

乔 良, 杨雁南*

(南京航空航天大学 应用物理系, 南京 211106)

摘要: 为了提高激光无线能量传输系统的转换效率, 基于单结 GaAs 光电池的工作原理, 用调节照射光电池的激光参量的方法, 从理论上对激光无线能量传输系统的有关部分进行了优化设计, 并通过实验研究了激光波长、激光强度等因素对光电池能量转换效率的影响。结果表明, 单结 GaAs 光电池对单色激光的光电转换效率远高于传统的单晶硅电池, 最高转化效率可达 61.2%。该结果对于激光无线能量传输技术的应用具有一定参考价值。

关键词: 激光技术; 激光无线能量传输; 单结 GaAs 光电池; 转换效率

中图分类号: TN249 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.003

Experimental research of laser wireless power transmission efficiency

QIAO Liang, YANG Yannan

(Department of Physics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to improve the conversion efficiency of the laser wireless power transmission system, based on the working principle of single junction GaAs photovoltaic cell, by the method of adjusting the parameter of laser which irradiated the photovoltaic cell, an optimization scheme was designed to each part of the laser wireless power transmission system theoretically. The relation between the conversion efficiency with laser wavelength and incident intensity was measured experimentally and discussed theoretically. The results show that the conversion efficiency of GaAs photovoltaic cell is improved obviously compared with monocrystalline silicon photovoltaic cell for monochromatic laser. The maximum conversion efficiency reaches 61.2%. The conclusions have a certain reference value for the application of laser wireless power transmission.

Key words: laser technique; laser wireless power transmission; single junction GaAs photovoltaic cell; conversion efficiency

引 言

无线能量传输技术^[1-3]是一种通过真空或空气介质传播电磁波以实现电能传输的技术。目前, 对于长距离的能量传输而言, 激光和微波被认为是最有应用前景的两种传输载体。由于激光具有单色性好、方向性好、能量集中的优点, 即使在较小发射功率的条件下, 激光无线能量传输系统也能实现远距离的电能传输, 同时系统所需的发射和接收设备的体积和质量只需要同类微波设备的 1/10, 且没有与通信卫星相互干扰的风险, 因此在飞行器、人造卫

星、航天器等空间用电设备领域具有较好的应用前景。

基于激光在无线能量传输中具备的上述优势, 欧美等发达国家都已对激光无线能量传输进行了研究。其中代表性的工作有: 2005 年美国国家航空和宇宙航行局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的马歇尔空间飞行中心首次利用强激光(输出功率 500W、输出波长 940nm), 通过对 15m 以外微型飞行器表面的三结 Ga:In:P₂ 光电池进行照射, 保证了微型发动机的正常工作, 带动飞机飞行^[4]。在 2007 年的光能定向传输竞赛中, 为了提高太空电梯的爬升速率, 获得冠军的加拿大萨斯喀彻温(Saskatchewan)大学队首次选择近红外激光器(之前使用的光源为聚光灯和太阳光)作为光能定向传输系统的光源, 充分验证了运用激光实现无线传输能的优越性^[5]。2007 年, 欧洲宇航防务集团

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377080)

作者简介: 乔 良(1990-), 男, 硕士研究生, 现从事激光应用方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yangyn@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2013-09-25; 收到修改稿日期: 2013-11-19

(European Aeronautic Defense and Space Company, EADS) 的工程师也采用了激光无线能量传输技术为 250m 以外的微型船——“漫步者”提供电能^[6]。此外,在 NASA、美国环境和能源技术办公室及乌克兰联合进行的空间太阳能发电计划中也包含了激光无线能量传输系统的部分。按照计划,他们将在地球同步轨道上建立一个太阳能发电站,并将能量汇聚后通过无线能量传输技术传送到地面^[7-8]。

激光无线能量传输技术涉及到激光器结构设计、高功率激光在大气中的传输效率、单色激光辐射下光电池的光电转化效率等问题。目前,国内针对激光无线能量传输的研究还鲜有报道^[9],但基于传统的光学设计和激光应用等领域,已有多位研究者对于大功率激光器、高斯光束整形、光电池光电转换效率等问题进行了理论研究和实验测量^[10-12]。作者基于他们的相关工作,构建了一套激光无线能量传输系统,该系统首先通过电激励半导体或固体激光器,将电能转换为激光能量,激光束被扩束准直后自由传输,照射到远处的光电池上再转换为电能。采用该系统实验研究了单结 GaAs 光电池在各种波长情况下,激光照射强度与能量转换效率之间的关系。结果表明:采用波长为 808nm 的激光,照射到光电池上的强度为 $0.230\text{W}/\text{cm}^2$ 时,系统具有最佳的电-光-电转换效率。

1 激光无线能量传输系统的设计与分析

1.1 激光无线能量传输系统的组成

激光无线能量传输系统由激光器、激光扩束准直系统、单结 GaAs 光电池及光功率、电功率测量系统组成,如图 1 所示。

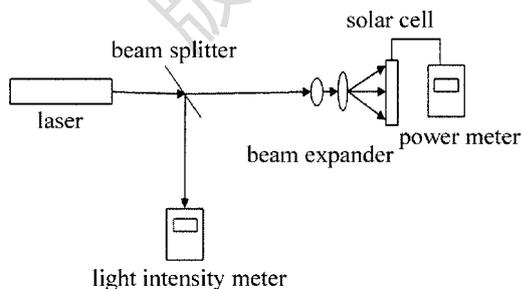


Fig. 1 Laser wireless power transmission system

系统通过电激励激光器发射激光,激光经扩束准直系统整形后可均匀照射在整个光电池表面,传输的激光光功率、光电池的开路电压、短路电流等参量可由光功率、电功率测量系统测量得出。

1.2 系统各部分设计及能量传输效率分析

1.2.1 激光器 激光器作为激光无线能量传输的重要发射部件,其性能、参量直接影响到整个系统的能量传输效率。目前激光器根据工作物质不同可以分为气体激光器、固体激光器和半导体激光器等。对于激光无线能量传输系统而言,激光器的选择应遵从以下原则:(1)较高的电光转换效率;(2)较小的光束发散角;(3)较高的发射功率;(4)较小的尺寸;(5)较低的价格。半导体激光器价格低廉,电光转换效率高(可达 70%),远高于气体激光器和固体激光器(大约 30%)。由于采用激光二极管阵列组成的叠阵阵列结构,半导体激光器可以根据需要实现各种功率级的激光输出。而德国 DILAS 公司也在 2007 年成功研制出适用于远距离无线能量传输的 10kW 级半导体激光器模块,发散角满足快轴小于 6mrad、慢轴小于 30mrad^[5]。故本实验中采用了半导体激光器(输出激光波长为 808nm 和 980nm 的红外光半导体激光器),同时,为了研究 GaAs 光电池对不同波长单色光的转换效率,也对由固体激光器输出的波长为 671nm 的红光与波长为 532nm 的绿光的转换效率进行了测量。

1.2.2 扩束准直系统 虽然激光器输出方向性极好的细激光束,但由于激光无线传输系统需要光束在空间长距离传播。为了实现能量转化的高效率,理论上要求激光束能够准直均匀地耦合到光电池的全表面。因此,激光器输出的光束,需要根据光电池表面的尺寸和传输距离等数据进行扩束和准直,以获得发散角极小、光斑尺寸合适的激光束。

本实验中选用倒置的开普勒望远镜系统作为扩束准直系统。系统由一个短焦距的正透镜 1(焦距为 f_1)和较长焦距的正透镜 2(焦距为 f_2)组成,可实现对由左向右入射光束的扩束和准直,如图 2 所示。激光器输出的高斯光束通过透镜 1 后其束腰半径由 w_0 缩小到 w_0' ,发散角由 θ 增大到 θ' ;正透镜 2 的焦点与 w_0' 位置重合,光束经透镜 2 后束腰半径由 w_0'

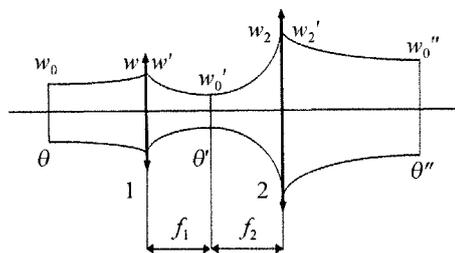


Fig. 2 Inverted telescope system

增大到 w_0'' , 发散角由 θ' 缩小到 θ'' 。根据高斯光束性质可推出由该系统出射的高斯光束束腰半径 $w_0'' = \lambda f_2 / (\pi w_0')$ [11], 其中 λ 为高斯光束的波长。 w_0'' 随着 w_0' 的缩小而增大, 从而实现扩束。

为了增加系统的总传输效率, 减少因通过透镜而产生的光束形变, 获得截面较大的光束, 透镜 1 和透镜 2 根据激光器输出波长选用相应光学镀膜的玻璃透镜, 且透镜 2 采用大口径的双胶合消像差透镜。高斯光束的扩束倍率和发散角压缩率分别由下式给出 [11]:

$$M = \frac{w_0''}{w_0'} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{\pi w_0'^2}\right)^2} \quad (1)$$

$$M' = \frac{\theta}{\theta''} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{\pi w_0'^2}\right)^2} \quad (2)$$

本实验中半导体激光器输出光束光斑为 $5\text{mm} \times 8\text{mm}$ 、光电池表面积为 $30\text{mm} \times 40\text{mm}$, 取 $f_1 = 45\text{mm}$, 由上式可估算 $f_2 \approx 220\text{mm}$, 实验中采用 $f_2 = 200\text{mm}$ 。

1.2.3 光电池 光电池按照材料分类可分为硅光电池、多元化化合物光电池、聚合物多层修饰电极型光电池、纳米晶光电池、有机光电池等, 按照结晶薄膜层数分类可以分为单结光电池和多结光电池。

对于不同波长的单色光, 即使辐照度相同, 光电池单位面积产生的光电流密度也不同。光电池的短路电流与入射光波长有关的特性称为光电池的光谱响应。光谱响应表明了光电池对不同波长光的光电转换能力。

电流-电压曲线 (I - V 曲线) 可以直观地描述光电池的 electrochemical characteristics (见图 3)。其中 I_s 为光电池的短路电流, V_o 为光电池的开路电压, P_{\max} 为光电池输出的最大电功率, 其相应的电流值为 I_p , 电压值为 V_p , P_{\max} 与 I_s 和 V_o 的关系为:

$$P_{\max} = F I_s V_o \quad (3)$$

式中, F 为光电池的填充因子, 它与 V_o 之间存在直接关系, 有经验公式 [13]:

$$F = \frac{V_o - \frac{kT}{q} \ln[qV_o / (kT) + 0.72]}{V_o + kT/q} \quad (4)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数, T 为光电池的温度, q 为单电子电荷量。因此在实验中通过测量短路电流 I_s 和开路电压 V_o 可求出光电池输出的最大电功率 P_{\max} 。

目前市场上大部分光电池材料的带隙宽度仅能实现与太阳光谱的部分匹配, 虽然通过设计多层

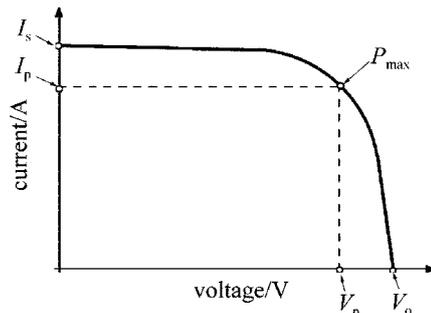


Fig. 3 Current-voltage (I - V) curves of the photovoltaic cell

结构可以拓展光电池的响应光谱范围, 但对太阳光的转换效率仍普遍较低。不同于传统的光电池设计要求, 由于本实验中所用能量载体为单一频率的激光, 单结光电池即可满足要求。根据光电池的光谱响应曲线, 选择入射光的波长为光谱响应曲线峰值处的波长, 即可实现能量转换效率的优化。在光电池材料选择方面, 已报道的经过光谱响应优化的单结硅光电池最高转化效率为 27.7% [14], 而近年来随着多元化化合物光电池研究的不断深入, 经过光谱响应优化的单结 GaAs 光电池的最高转化效率已经突破 50% [8], 较之于硅光电池有很大优势。此外, GaAs 光电池还具有更高的开路电压, 更加理想的光学带隙, 抗辐射能力强, 对温度不敏感等优点。并且选择单结光电池还有利于简化光电池的制作工艺, 减少电池内阻, 降低系统成本。因此, 本系统采用了单结 GaAs 光电池作为激光能量传输的接收组件。

2 激光无线能量传输效率的实验测量与结果分析

实验中分别选用了 4 个不同频率的半导体或固体激光器 (输出激光波长分别为 532nm, 671nm, 808nm, 980nm) 作为发射系统, 它们的输出功率均连续可调, 其大小由激光功率计测量。准直扩束系统选择倒置的开普勒望远镜系统 (焦距分别为 45mm 和 200mm), 规格为 $30\text{mm} \times 40\text{mm}$ 的单结 GaAs 光电池作为接收装置。两个万用表分别测量激光照射下光电池的短路电流 I_s 和开路电压 V_o 。

激光无线能量传输效率的测量方法如下: 对某种输出波长的激光器, 调节其工作电流在不同数值 (即激光器输出功率不同), 分别测量激光器输出端、扩束准直透镜后以及在空气中传输一端距离到达光电池处这 3 个位置上的激光功率和光斑大小, 即可得到不同激光强度下扩束准直透镜、空气对激

光强度的衰减以及光电池对激光的转换效率。实验中激光器与光电池距离为 2m, 到达光电池处的激光光斑与光电池大小吻合。依次采用输出波长为 532nm, 671nm, 808nm, 980nm 的激光照射光电池, 测得了单结 GaAs 光电池输出端的开路电压/短路电流随激光强度的变化曲线如图 4a ~ 图 4d 所示。由图可知, 对于波长为 532nm, 671nm, 808nm 的激光, 光电池的开路电压不随激光强度变化, 数值稳定在 1V 左右, 短路电流开始随着入射光强的增强线性增

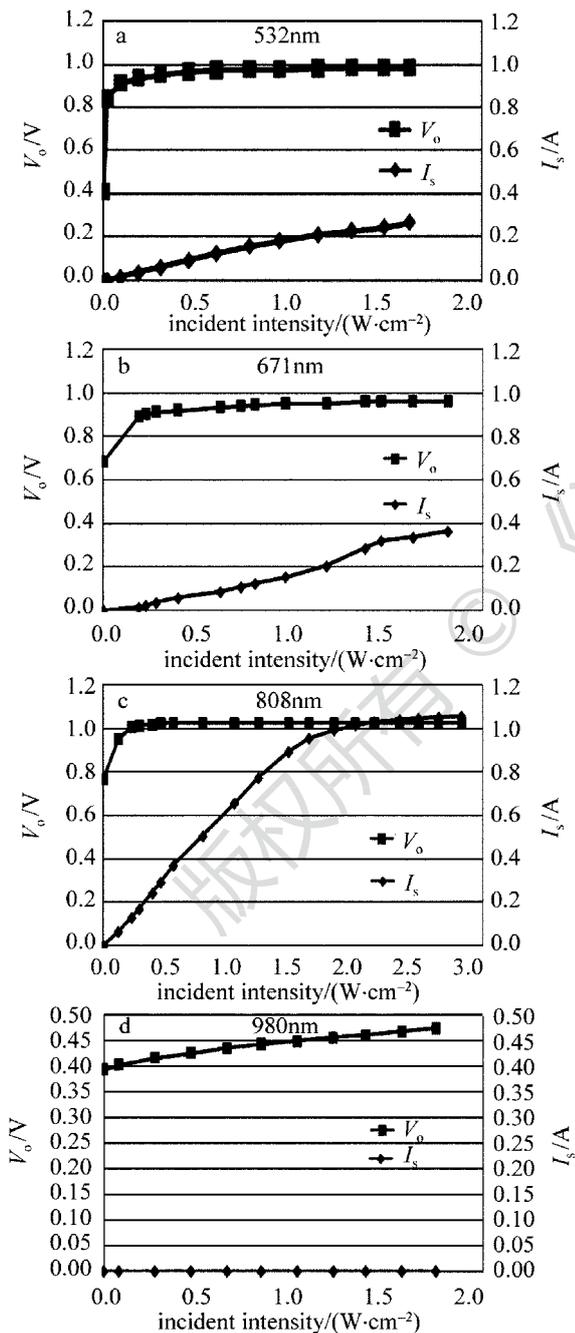


Fig. 4 V_o and I_s of the single junction GaAs photovoltaic cell versus incident intensity

加, 当光强达到吸收阈值后, 短路电流趋于饱和。而对于 980nm 的激光, 虽然存在 0.5V 左右的开路电压, 但无论光强如何, 短路电流几乎为 0。

通常定义激光无线能量传输系统的能量转换效率 = 光电池输出的最大功率/激光器输出总功率。由实验测量的激光强度及上述光电池输出的最大功率, 即可得到不同波长和强度下该传输系统的能量转换效率随激光强度的变化关系, 如图 5 所示。

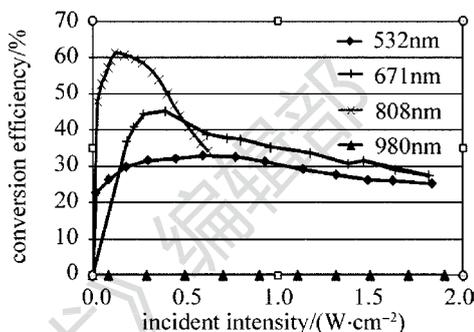


Fig. 5 Single junction GaAs photovoltaic cell's efficiency versus incident intensity

由图 5 可以看出, 当采用 532nm 激光照射光电池时, 最大能量转换效率为 32.8%, 此时光电池上的激光功率密度为 0.596W/cm²。当采用 671nm 激光照射光电池时, 最大能量转换效率为 54.1%, 此时光电池上的激光功率密度为 0.393W/cm²。当采用 808nm 激光照射光电池时, 能量转换效率最高, 达到了 61.2%, 此时光电池上的激光功率密度为 0.23W/cm²。对于 980nm 的激光, 光电池的能量转换效率几乎为 0。上述实验结果可由光电池的工作原理和 GaAs 的能带结构得到合理解释: 根据光生伏特原理, 当频率为 ν 的激光照射在光电池表面时, 若光子能量 $h\nu$ (h 为普朗克常数) 大于光电池材料的能隙宽度, 则该光子可打出电子-空穴对, 相反地, 若光子的能量 $h\nu$ 小于光电池材料的能隙宽度, 该光子则无法打出电子-空穴对, 只能转化成热能。因此, 对于能隙宽度 $E_g = 1.42\text{eV}$ 的 GaAs 光电池, 只有当入射光的频率 $\nu > E_g/h$, 即波长 $\lambda < c/\nu \approx 874\text{nm}$ 时才会有光电转换效率。又由于光强 $I = Nh\nu = Nhc/\lambda$ (N 为单位时间内照射到材料单位面积上的光子数), 故在保证光子能量大于光电池能隙宽度, 即 $\lambda < 874\text{nm}$ 的前提下, 对于同一光强, 频率小(波长大)的光, 光子数 N 更大, 从而打出的电子-空穴对数量更多, 光电池输出的电能也更多, 因此得到了更高的能量转换效率。

另外, 由图 5 中还可以看出, 随着激光输出功率

的增加,单结 GaAs 光电电池的能量转换效率呈现先快速增加后缓慢减小的趋势。这是因为对于光电电池而言存在着复合辐射机制。由于复合辐射发射的光子能量通常略大于电池材料的能隙宽度,导致光电电池内部存在着再吸收过程,因此只有净复合对系统效率才有贡献。当入射光强较小时,辐射复合在总入射能量中所占的比例较大,系统能量转换效率也较低,随着入射光强的增加,辐射复合比例不断下降,系统效率因此得到提高,当辐射复合比例下降为 0 时,系统转换效率达到最大值。又因高强度激光照射下光电电池的热阻效应表现明显,因此入射光强再增加时,系统的转换效率又呈现缓慢减小的趋势。

3 结 论

在激光传输能量过程中,单结 GaAs 光电电池表现出良好的性能,当光电电池由 808nm 的激光以 $0.23\text{W}/\text{cm}^2$ 的功率密度照射时,系统最大能量转换效率可达 61.2%,且当光功率密度增强到 $1.15\text{W}/\text{cm}^2$ 时,系统最大能量转换效率仍可以保持在 40% 以上。本实验中使用的 1 块表面积为 $30\text{mm} \times 40\text{mm}$ 的光电电池产生了 1W 以上的输出功率,这为光电电池接收系统的小型化提供了条件。此外,与传统硅光电电池(输出电压约为 0.5V)相比,单结 GaAs 光电电池稳定的高开路电压(输出电压为 1V)也更易于被充电设备利用。在工程上,还可通过多个光电电池串联或增加升压电路模块的方式,实现光电电池对锂电池的充电,从而为远距离工作又不易实施有线能量输送的设备进行能量补充。

参 考 文 献

- [1] GREEN A W, BOYS J T. 10kHz inductively coupled power transfer-concept and control [C] // The Fifth International Conference on Power Electronics and Variable-speed Drives, New York, USA: IEEE, 1994: 694-699.
- [2] LU Y. Development of a contactless power converter [C] // IEEE International Conference on Industrial Technology. New York, USA: IEEE, 2002: 786-791.
- [3] ZHANG M Ch, WANG J H, SHI Y W. Review of the wireless power transmission technology [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2009, 26 (5): 485-488 (in Chinese).
- [4] BLACKWELL T. Recent demonstration of laser power beaming at DFRC and MSFC [C] // AIP Conference Proceeding Beamed Energy Propulsion. New York, USA: American Institute of Physics, 2005: 73-85.
- [5] GEORGE T, TOBIAS K, BEN S. High power semiconductor laser cheer the united state light beam transmission competitions [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008(10): 64-66 (in Chinese).
- [6] HOFFMAN J M. How to get fuel to future interplanetary vehicles: beam it up to them with lasers [J]. Machine Design, 2007, 79 (5): 78-88.
- [7] 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. Washington DC, USA: NASA, 2004: 4-8.
- [8] DICKISON R M. Wireless power transmission technology state of the art the first Bill Brown lecture [J]. Acta Astronautica, 2003, 53(4/10): 561-570.
- [9] YANG W, LIU Ch J, WU X, et al. Preliminary research on low-power laser wireless energy transmission [J]. Modern Physics, 2013, 3(1): 49-53 (in Chinese).
- [10] CAO Y H, LIU Y Q, QIN W B, et al. Kilowatt diode laser with beam quality better than all solid state laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2282-2285 (in Chinese).
- [11] LI J X. Collimated laser beam expander design and simulation [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009 (3): 29-31 (in Chinese).
- [12] XIONG Sh Zh, ZHU M F. Basic and applied of solar cells [M]. Beijing: Science Press, 2009: 569-577 (in Chinese).
- [13] GREEN M. Solar cells: operating principles, technology and system applications [R]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1982: 85-102.
- [14] YANG P, YANG Y N. The research of monocrystalline silicon solar cells efficiency under laser [J]. Laser Technology, 2012, 36 (5): 696-699 (in Chinese).