

文章编号:1001-5078(2025)03-0420-05

· 光电技术与系统 ·

## 激光无线传能系统光电池阵列排布研究

孟祥翔<sup>1</sup>, 刘雨辉<sup>1</sup>, 邱明杰<sup>1</sup>, 徐新瑞<sup>2</sup>

(1. 烟台大学 物理与电子信息学院, 山东 烟台 264005; 2. 山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264000)

**摘要:**为提高激光无线传能系统接收端的光电转换效率、对比验证接收端不同优化设计方法的优劣,开展了光电阵列不同排布方式的实验研究。分别研制了单一串联排布、顺次串并排布、依据照度分布的串并排布三种光电池阵列,并开展了实验研究。在高斯分布光斑照射下,对比了顺次串并排布与依据照度分布的串并排布输出特性,并对比了单一串联排布在均匀光照下的输出特性。结果表明,不同串并排布方式、不同光照条件下,得到的光电效率区别较大。单一串联排布在均匀光照下光电转换效率最高,为39.14%;在高斯分布光照条件下,依据照度分布的串并排布光电转换效率为33.3%,比顺次串并排布效率高出一倍。该结果可对激光无线传能系统接收端的优化设计提供参考。

**关键词:**激光无线能量传输;光电池阵列排布;光伏接收器;GaAs光电池;光电池效率

**中图分类号:**TN202, TN365 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.015

## Photocell array arrangement study for laser wireless energy transmission system

MENG Xiang-xiang<sup>1</sup>, LIU Yu-hui<sup>1</sup>, QIU Ming-jie<sup>1</sup>, XU Xin-rui<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China;

2. Shandong Institute of Aerospace Electronics Technology, Yantai 264000, China)

**Abstract:** In order to improve the photoelectric conversion efficiency at the receiving end of the laser wireless energy transmission system, and to compare and verify the advantages and disadvantages of different optimization design methods at the receiving end, experimental studies on different arrangements of photoelectric arrays are carried out. In this paper, three types of photovoltaic arrays, a single series layout, a sequential series-parallel combination layout, and a series-parallel combination layout based on the illumination distribution, are developed and experimentally investigated. Under Gaussian distributed spot irradiation, the output characteristics of the sequential series-parallel arrangement and the series-parallel arrangement based on illumination distribution are compared, and the output characteristics of the single series-parallel arrangement under uniform illumination are also compared. The results show that the photoelectric efficiencies obtained in different series-parallel arrangements and under different illumination conditions are quite different. The single series arrangement has the highest photoelectric conversion efficiency under uniform illumination, which is 39.14%. And under Gaussian distributed illumination, the photoelectric conversion efficiency of the series-parallel arrangement based on the illumination distribution is 33.3%, which is twice as much as the efficiency of the sequential series-parallel arrangement. The results can provide a reference for the optimal design of the receiving end of the laser wireless energy transmission system.

**作者简介:**孟祥翔(1988-),男,博士,高级工程师,副教授,主要从事激光光学系统方面的研究。E-mail:mengxx326@126.com

**通讯作者:**徐新瑞(1988-),男,博士,高级工程师,主要从事激光光电设备的研究。E-mail:xuxinrui513@163.com

**收稿日期:**2024-05-15

**Keywords:** laser wireless energy transfer; photovoltaic cell array layout; photovoltaic receiver; GaAs photovoltaic cell; photovoltaic cell efficiency

### 1 引言

激光无线传能是远距离无线充电的主要方法,在空间太阳能电站、无人机续航、月球探测等领域有广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>。提升能量传输效率是激光无线传能系统面临的关键问题。影响激光无线传能效率的因素主要包括激光器的电光转换效率、空间传输损耗以及接收装置的光电转换效率等<sup>[5-6]</sup>。

激光无线传能系统接收装置的核心器件是光电池。由于单片光电池尺寸小、输出电压低,通常将多个光电池进行串并联设计,形成光电池阵列<sup>[5]</sup>。光电池的串联可以提高输出电压,但对同一个串联支路上的光照均匀性要求较高。由于激光器发射的激光束为高斯光束,接收端光电池阵列的接收效率受到光斑照度不均匀的影响,同一串联电路上的光电池在光照度差异较大,整体光电转换效率会大大降低<sup>[7-8]</sup>。在光电池串联支路满足输出电压的要求后再对多个支路进行并联设计,可以提高输出电流,增大光能接收面积。为了避免光斑不均匀造成的影响,通常有光斑匀化和依据照度分布排布光电池阵列两种方法。

为了给激光无线传能系统接收端的优化设计提供参考,本文设计并研制了单一串联排布、顺次串并排布、依据照度分布的串并排布三种光电池阵列,进行了高斯光束照射下的顺次串并排布和依据照度分布串并排布的对比实验、单一串联排布的均匀光照实验。

### 2 分析设计

光电池阵列是由多个光电池组成的光能接收面,在光照的作用下,将光能转化为电能,工作原理类似于单个光电池。由于目前用于激光无线传能上的单个光电池输出电压基本在 1 V 左右,无法满足负载的供电需求,需通过串联提高电压,再将多个串联支路通过并联增大电流,进而提高光电池阵列的输出功率。对于串联的光伏电池,其开路电压  $V_{oc}$  和短路电流  $I_{sc}$  为:

$$V_{oc} = V_{oc,1} + V_{oc,2} + \dots + V_{oc,n} \quad (1)$$

$$I_{sc} = \min(I_{sc,1}, I_{sc,2}, \dots, I_{sc,n}) \quad (2)$$

最佳工作电压  $V_{mp}$  和最佳工作电流  $I_{mp}$  为:

$$V_{mp} = V_{mp,1} + V_{mp,2} + \dots + V_{mp,n} \quad (3)$$

$$I_{mp} = \min(I_{mp,1}, I_{mp,2}, \dots, I_{mp,n}) \quad (4)$$

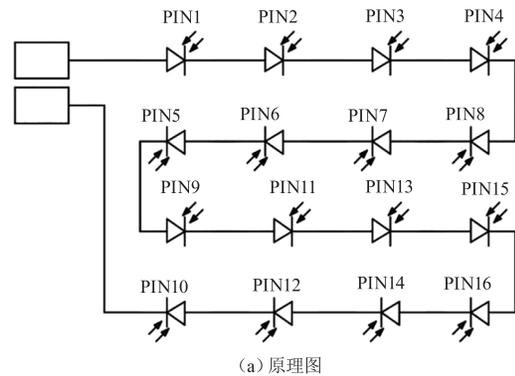
最大输出功率为:

$$P_{mp} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (5)$$

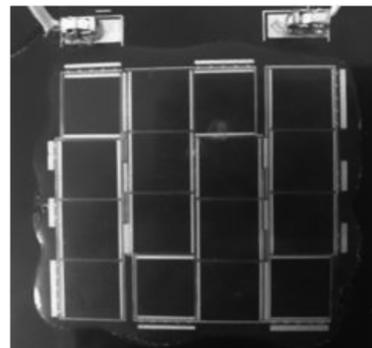
由此可知,在串联光伏电池的输出功率由该串联电路上输出电流最小的光电池决定。而光伏电池的输出电流由其光照条件决定。为得到最大输出功率,需尽可能保证入射光斑照度分布均匀。而激光的高斯光束分布特点,需增加匀光光学系统对光斑进行匀化<sup>[8]</sup>,或者在接收端对光电池做特殊的排布。

为了研究光电池排布和光照均匀性的对最大输出功率的影响,设计了单一串联排布、顺次串并排布、依据照度分布的串并排布三种光电池阵列进行实验研究。

三种排布方式的光电池阵列均由 16 块 10 mm × 11 mm 的 GaAs 光电池组成,单一串联排布光电池阵列将 16 块 GaAs 电池依次串联,设计原理如图 1(a) 所示,加工后实物如图 1(b) 所示,尺寸 42.5 mm × 46.5 mm,其中光敏面占空比为 80.96 %。



(a) 原理图



(b) 实物图

图 1 单一串联排布光电池阵列原理图及实物图  
Fig. 1 Schematic and physical diagram of a single series-array photovoltaic battery array

顺次串并排布光电池阵列将 16 个光电池以 2

×2 阵列的四个为一组进行串联,再进行并联,设计原理如图 2(a)所示,加工后实物如图 2(b)所示,尺寸为 42 mm × 47 mm,光敏占空比为 81.05 %。高斯光束入射后,每一串联电路接收总功率相近,但串联电路上的每一光电池接收功率相差较大。

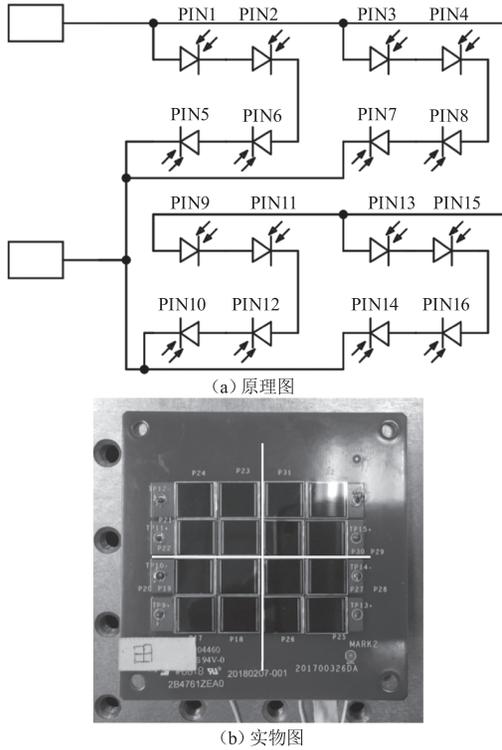
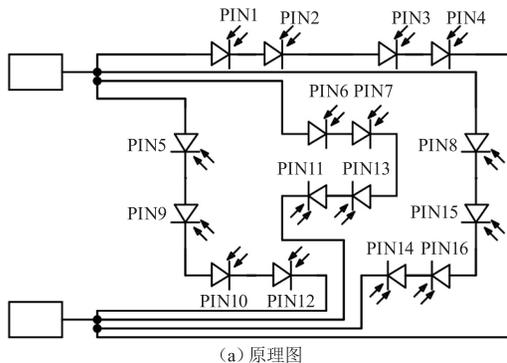


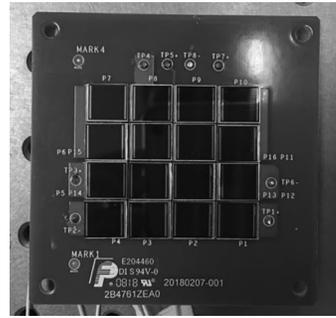
图 2 顺次串并排布光电池阵列原理图及实物图

Fig. 2 Schematic and physical diagrams of photovoltaic battery arrays arranged in series-parallel combination

依据照度分布的串并排布光电池阵列是依据激光照射光斑在接受平面上的照度呈高斯分度的特点,将 16 块 GaAs 光电池照度变化率分为四组,中心四个光电池片串联,四周光电池依次串联,然后再进行并联,设计原理如图 3(a)所示,实物如图 3(b)所示,尺寸为 42 mm × 47 mm,其中光敏占空比也为 81.05 %。这种排布方式中同一个串联电路上的光电池接收功率近似相等。



(a) 原理图



(b) 实物图

图 3 依据照度分布的串并排布光电池阵列原理图及实物图

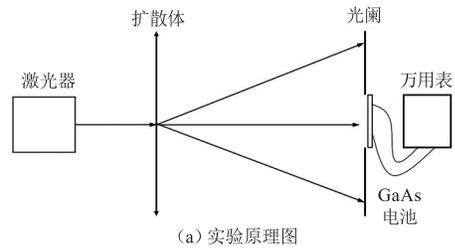
Fig. 3 Schematic and physical diagrams of a series-parallel array of photovoltaic cells based on illuminance distribution

### 3 实验研究

依据照度分布的串并排布的光电池阵列是为了使光电池的分布与照度分布位置相符,避免同一串联电路上的光电池接收光照不均匀。因此,首先实验对比在高斯分布光斑照射下,顺次串并排布与依据照度分布的串并排布的输出特性。同时,为了判断接收端不同优化设计方法的优劣,还进行了单一串联排布在均匀光照下的激光传能实验作为对比。

#### 3.1 高斯光照下顺次串并与依据照度分布串并的对比

高斯光照下顺次串并排布与依据照度分布串并排布的对比实验如图 4(a)、(b)所示。实验所用 808 nm 半导体激光器为准直空间光输出,光斑尺寸较小,在激光器出光口后放置一毛玻璃散射片,准直空间光经过毛玻璃散射片后发散角变大,在一定距离处可得到与光电池尺寸接近的高斯光斑,如图 4(c)所示。为了对照射在光电池阵列上的激光功率进行测量,在光电池阵列前设置一矩形光阑,光阑尺寸与光电池阵列光敏面保持一致。



(a) 实验原理图



(b) 实验图

(c) 光斑图

图 4 高斯光照条件下对比实验

Fig. 4 Comparative experiments under Gaussian light conditions

当激光器输入电流 6 A 时,测得通过光阑的光功率为 1.93 W。分别将顺次串并排布光电池阵列和依据照度分布串并排布的光电池阵列紧贴光阑处,光电池板正负极连接电子负载。调节电子负载大小,测得顺次串并排布光电池板的伏安特性如图 6(a)所示,输出功率如图 6(b)所示,最大输出功率为 0.3168 W,光电转换效率为 16.4 %。测得依据照度分布串并排布的光电池阵列伏安特性如图 7(a)所示,输出功率如图 7(b)所示,最大输出功率为 0.646 W,光电转换效率为 33.3 %。因此,在同样的光照条件下,依据照度分布串并排布光电池阵列相较于未考虑光斑照度分布的顺次串并排布光电池阵列光电转换效率有显著提升。结果表明,光斑照度分布对光电池阵列的转换效率具有重要影响。通过采用依据照度分布的串并结合排布的光电池,能够更好地利用光斑高斯分布的特点,使光电池阵列在不均匀的光照条件下更加高效地转换光能为电能。

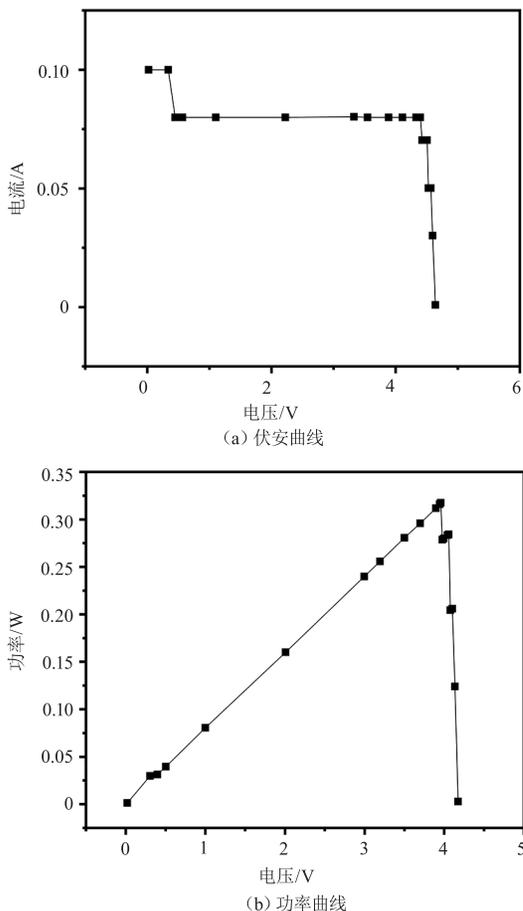


图 5 顺次串并排布光电池阵列伏安曲线与输出功率曲线  
Fig. 5 Voltammetric curve and output power curve of photovoltaic battery arrays arranged in series-parallel combination

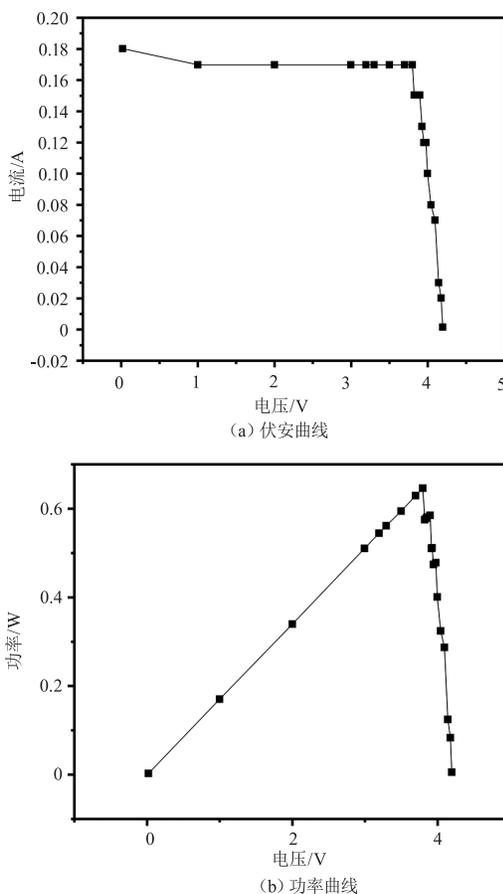


图 6 依据照度分布的串并排布光电池阵列伏安曲线与输出功率曲线

Fig. 6 Voltammetric curve and output power curve of a series-parallel array of photovoltaic cells based on illuminance distribution

### 3.2 均匀光照条件下的单一串联排布实验

均匀光照条件下的单一串联排布光电池阵列实验如图 7(a)、(b)所示。为了得到均匀光斑,采用了多模光纤输出的 808 nm 半导体激光器,经过焦距 400 mm、口径 180 mm 的准直镜头进行准直,转变为直径 180 mm 的准直光束,利用与光电池阵列尺寸匹配光阑截取准直光束中心区域,得到近似为均匀分布的照明光斑。

在入射光功率为 3.96 W 时,测得单一串联排布光电池阵列在均匀光照下的伏安曲线如图 8(a)所示,输出功率如图 8(b)所示,最大输出功率为 1.55 W,光电转换效率为 39.14 %。

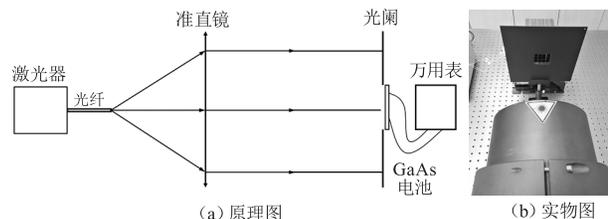


图 7 均匀光照条件下实验

Fig. 7 Experiments under uniform light conditions

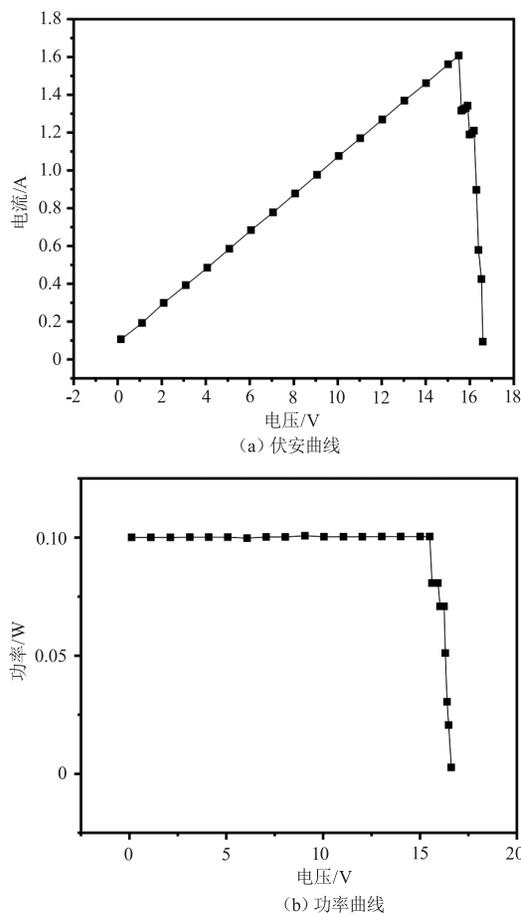


图8 不同入射功率下测得伏安、功率曲线

Fig. 8 Voltammetric and power curves measured at different incident powers

通过以上实验可知,提升激光无线传能系统接收端光电转换效率的首选方法应为改善入射光斑的均匀性。若在接收端体积、重量受限制的条件下无法实现光斑匀化,可将光电池按照照度分布进行排布,使同一串联电路上的光电池接收光照尽量一致。

#### 4 结论

激光无线传能系统接收端的优化设计对光电转换效率的提升有很大影响。设计研制了单一串联排布、顺次串并排布、依据照度分布的串并排布三种光电池阵列,开展了高斯光束照射下顺次串并排布、依据照度分布的串并排布实验与均匀光照下单一串联排布实验,测得光电转换效率分别为 16.4%、33.3%、39.14%。通过实验对比可知,在非均匀光照下,光电池按照照度分布进行排布可有效提升光电池阵列的光电转换效率,但要使光电池阵列实现最优性能,首选方法应为对入射光斑进行匀化。该结果可为激光无线传能系统的设计、论证提供借鉴参考。

#### 参考文献:

- [1] Cui J G, Liu M, Zhang Z T, et al. Robust UAV thermal infrared remote sensing images stitching via overlap-prior-based global similarity prior model[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 270 - 282.
- [2] Li Zhengyu, Shi Dele, Shen Jingshi, et al. Laser-based wireless energy transfer technology[J]. Space Electronics, 2013, 10(3): 71 - 76. (in Chinese)  
李振宇, 石德乐, 申景诗, 等. 基于激光的无线能量传输技术[J]. 空间电子技术, 2013, 10(3): 71 - 76.
- [3] Gao Huixiang, Cao Yang, Li Jinzhan. Research on new laser multibeam system powered UAV clustering scheme[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(4): 529 - 535. (in Chinese)  
高会翔, 曹阳, 李金展. 新型激光多波束系统供能无人机集群方案研究[J]. 激光与红外, 2024, 54(4): 529 - 535.
- [4] Liu Yan, Xiao Jiyu, Zhao Xiaoling, et al. Overview of the development and application of wireless energy transmission technology[J]. New Technology of Electrical Engineering and Electricity, 2023, 42(2): 48 - 67. (in Chinese)  
刘耀, 肖晋宇, 赵小令, 等. 无线电能传输技术发展与应用综述[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(2): 48 - 67.
- [5] Hua Wenshen, Liu Xiaoguang, Zhang Damin. Output characteristics of laser-irradiated single-junction GaAs photovoltaic cells[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(12): 1463 - 1466. (in Chinese)  
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特性[J]. 激光与红外, 2016, 46(12): 1463 - 1466.
- [6] Zhang Wudi, Ni Wang, Wang He, et al. Research on high-efficiency laser battery for space[J]. Power Technology, 2023, 47(8): 1092 - 1094. (in Chinese)  
张无迪, 倪旺, 王赫, 等. 空间用高效激光电池研究[J]. 电源技术, 2023, 47(8): 1092 - 1094.
- [7] Shi Zhenlei, Meng Wenwen, Shen Jinshi, et al. Tracking design of laser wireless energy transmission APT system for UAV[J]. Laser Technology, 2019, 43(6): 809 - 814. (in Chinese)  
时振磊, 孟文文, 申景诗, 等. 无人机激光无线能量传输 APT 系统跟踪设计[J]. 激光技术, 2019, 43(6): 809 - 814.
- [8] Meng Xiangxiang, Shen Jinshi, Shi Dele, et al. Research on secondary light concentration of laser wireless energy transmission receiving system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(7): 76 - 80. (in Chinese)  
孟祥翔, 申景诗, 石德乐, 等. 激光无线能量传输接收系统二次聚光研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 76 - 80.