

光强均匀度对 GaAs 电池组光电转换效率的影响

吴政南, 谢江容, 杨雁南

(南京航空航天大学 应用物理系, 江苏 南京 211106)

摘要: 为了研究激光光强均匀度对 GaAs 电池转换效率的影响, 基于单结 GaAs 电池的工作原理, 利用等效电路对其在受到不同光强激光照射时的光电转换效率进行分析, 并通过实验测量不同光强均匀度情况下 GaAs 串联电池组的光电转换效率。结果表明, 光强均匀度对 GaAs 电池组的光电转换效率有很大影响。在极限条件下, 由光强不均匀性引起的热斑效应还会造成电池片的损毁。

关键词: 光强均匀度; 单结 GaAs 光电池; 转换效率; 等效电路

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0606001

Effect of light intensity uniformity on the photoelectric conversion efficiency of GaAs cells

Wu Zhengnan, Xie Jiangrong, Yang Yannan

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

Abstract: In order to study the effect of light intensity uniformity on the conversion efficiency of GaAs cells, based on the working principle of single junction GaAs cell, the photoelectric conversion efficiency of GaAs cells was analyzed when the laser intensity was different by using the equivalent circuit, and the conversion efficiency of GaAs cells in different light intensity uniformity was studied by experiments. Results show that the light intensity uniformity has a great influence on the photoelectric conversion efficiency of the single junction GaAs cell. In some extreme conditions, it may cause the hot spot effect and completely destroy the GaAs cells.

Key words: intensity uniformity; single junction GaAs photovoltaic cell; conversion efficiency; equivalent circuit

收稿日期: 2016-10-25; 修订日期: 2016-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51377080, 51577091)

作者简介: 吴政南(1990-), 男, 硕士生, 主要从事激光应用方面的研究。Email: 630582640@qq.com

导师简介: 杨雁南(1963-), 女, 教授, 博士, 主要从事激光技术与应用方面的研究。Email: yangyn@nuaa.edu.cn

0 引言

激光远程充电技术是一种基于半导体光伏效应的新兴远程能量传输技术。由于激光具有单色性好、方向性好、能量集中的特点,因此用于接收光能并将其转换成电能的光电池设备体积小、质量轻,特别适用于微型飞行器、微小卫星等设备上,因此有非常广阔的应用前景^[1-4]。

现有技术条件下,单片光电池的输出电压通常比较低,如 Si 光电池的输出电压约为 0.6 V, CaAs 光电池约为 1 V,难以满足实际工作的需要,因此须将多个电池片连接成电池组使用。而影响光电池组能量转换效率的因素比较多^[5-9],其中包括光电池本身特性(能带结构、光吸收系数、匹配光谱等)、传输激光品质(光强均匀度、波长等)以及空间干扰等。

目前用于远程能量传输的大功率半导体激光器发出的激光束通常存在均匀性较差的缺点,文中通过等效电路的方法分析了激光的非均匀性对 CaAs 电池光电转换效率的影响,在此基础上,搭建了一套实验系统,实际测量了不同光强均匀度、不同入射光功率情况下串联电池组的光电转换效率。结果表明:其它条件相同的情况下,入射激光束光强均匀度越差, CaAs 电池组的光电转换效率就越低。

1 单结 GaAs 电池的光电转换原理及性能

1.1 GaAs 电池的性能与级联方式

GaAs 光电池^[10-11]的电学特性(即电流-电压曲线)如图 1 所示。其中 I_s 为光电池的短路电流, V_{oc} 为

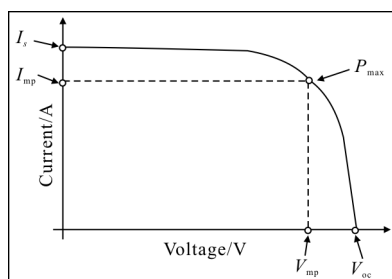


图 1 GaAs 光电池电流-电压曲线

Fig.1 Current-voltage(I-V) curves of GaAs photovoltaic cell

光电池的开路电压。光电池输出的最大电功率 P_{max} 与 I_s 、 V_{oc} 的关系为:

$$P_{max} = FF \cdot I_s \cdot V_{oc} \quad (1)$$

式中: FF 为光电池的填充因子,它与开路电压 V_{oc} 之间的关系为^[16]:

$$FF = \frac{V_{oc} - \frac{kT}{q} \ln(qV_{oc}/kT + 0.72)}{V_{oc} + kT/q} \quad (2)$$

式中: k 为波尔兹曼常数; T 为光电池的表面温度; q 为电子电量。光电池的光电转换效率可表示为:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_L} = \frac{FF \cdot I_s \cdot V_{oc}}{P_L} \quad (3)$$

式中: P_L 为照射到光电池表面的激光功率。因此在实验中可通过测量光电池表面的激光功率 P_L 、短路电流 I_s 和开路电压 V_{oc} 来求光电池的光电转换效率。

由测量可知,单片 GaAs 光电池的开路电压约为 1 V,在实际中,标准充电接口的充电电压一般为 4.8~5.2 V,因此 GaAs 电池很少单个使用,而是设计成由多片光电池组成的阵列,以获得所期望的电压或电流。光电池常见的级联方式有三种:串联结构、并联结构和串并联复合结构。三种方式各有优缺点。串联方式结构简单,可获得较高输出电压,然而当光电池阵列收到的光照强度不均匀时,光照较弱的光电池会作为负载消耗其他光电池的能量,产生“热斑效应^[12-15]”;并联结构电压稳定,可作为恒压源使用,但必须连接额外的升压电路才能获得较高的输出电压;复合结构较为灵活,拥有较高的输出电压且电压值较稳定,可以针对系统需求设计相应的级联结构,但制作工艺复杂,需要设计额外的外接电路才能连入系统中使用。该实验中,综合考虑实际条件和测量结果的精确性,采用了串联方式。

1.2 热斑效应的机理

热斑效应广泛存在于各种光伏系统中。常见定义为:在光伏系统中,互相连接的光电池因工作条件不匹配(即电池间失配)导致某些电池发热,从而降低光电转换效率的一种现象。引起热斑效应的原因主要有两类:一类为外界因素,即电池表面受光照不均匀,形成局部“阴影”,导致处于阴影中的某些电池发热;另一类为内部因素,即电池本身存在某些缺陷,导致缺陷处发热。

事实上,对于任何一种光电池阵列,都不可能做到电池之间的工作条件完全匹配,因此热斑效应存在于所有的光伏系统中。随着光电池制作工艺的提升,电池的内部结构愈加完善,由电池本身缺陷导致的发热现

象逐渐减小。目前,大部分光伏系统中的热斑效应都可近似认为是由于不均匀光照射电池表面引起的。

1.3 光强均匀度对 GaAs 电池组光电转换效率的影响

在光照条件下,GaAs 光电池的内部结构理论上可以用恒流源 I_p 、PN 结二极管 D 、串联电阻 R_1 、并联电阻 R_s 组成的电路来表示^[6],等效电路如图 2 所示。

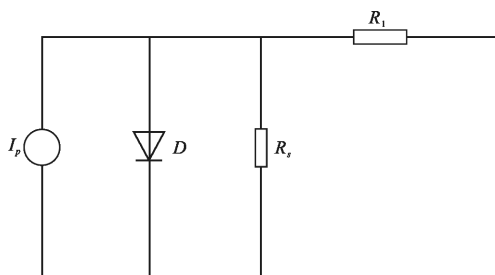


图 2 GaAs 光电池的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of GaAs photovoltaic cell

光电池的输出电流 I 可表示为:

$$I = I_p - I_D - \frac{V + IR_1}{R_s} \quad (4)$$

式中: I_D 为饱和漏电流,正常情况下一般小于 10^{-10} A/cm²,可忽略不计。 R_1 为电极消耗等引起的等效电阻,通常小于 $1 \Omega \cdot \text{cm}^2$, R_s 为 PN 结泄漏电流的等效电阻,一般大于 $1000 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

在正常光照下,GaAs 电池内阻所消耗的功率为:

$$P = P_1 + P_s \approx \left(1 + \frac{R_1}{R_s}\right) I^2 R_1 \approx I^2 R_1 \quad (5)$$

式中: P_1 和 P_s 分别为 R_1 和 R_s 上消耗的电功率。从上式可以看出这种情况下 GaAs 光电池消耗的功率与 R_1 的阻值正相关,因此正常工作条件下 GaAs 电池的内阻消耗很小。

当 GaAs 电池表面处于弱光照下,PN 结处于反向偏置状态,此时电池内阻所消耗的功率为:

$$P_1 = I^2 (R_1 + R_s) \approx I^2 R_s \quad (6)$$

由该式可知,电池消耗的功率与 R_s 的阻值正相关。通过(5)、(6)两式类比可知,弱光照时电池的内阻要比正常光照时增加数千倍。也就是说,当弱光照射 GaAs 光电池时,电池相当于内接了一个巨大的负载电阻,导致 GaAs 电池内部消耗的功率大幅度提高。

2 光强均匀度对 GaAs 电池组转换效率的实验测量及结果分析

几何光学中光照均匀度 μ 定义为:

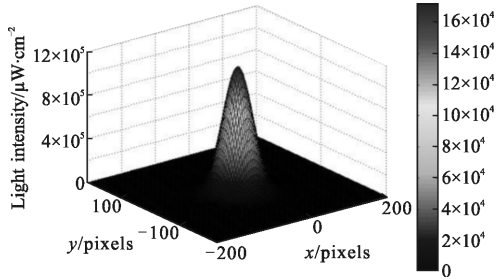
$$\mu = \frac{I_U(I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}})}{I_U} \quad (7)$$

式中: I_{MAX} 为表面最强辐射照度; I_{MIN} 为表面最弱辐射照度; I_U 为表面平均辐射照度。

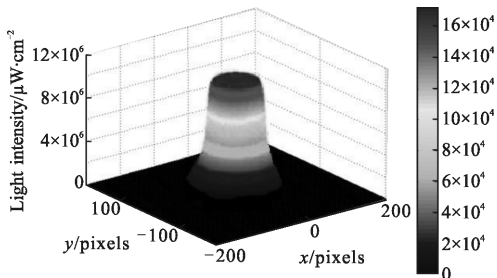
为了研究光强均匀度对 GaAs 电池组光电转换效率的影响,采用了德国 DILAS 公司生产的 LDM-3V-75A-BDS 型半导体激光器(输出激光波长为 808 nm,输出功率 0~50 W 连续可调)、光输出耦合光纤、光功率计、非球面镜光强匀化系统和光楔-曲面镜-棱镜光强匀化系统等装置。

实验采用如下方法测量不同光强均匀度照射下 CaAs 电池组的光电转换效率:激光器与光电池组间的距离为 2 m,依次采用不同光强均匀度的激光照射光电池。第一种方法:将激光直接由光纤耦合输出,不经任何均匀化处理,在距光纤输出端口 2 m 远处截面光斑的光强分布如图 3(a)所示。实验中测得此时光强均匀度约为 50.9%。先将光功率计放到光斑中心的光强最大处,测量激光器不同工作电流时该位置上的激光功率密度,得出此时的电流-光功率密度关系;再将光功率计横向平移至光强较弱的边缘处,测量某种工作电流时的激光功率密度,求出光强均匀度。然后将光功率计移出,放入光电池组件并做适当调节,保证光功率密度较大部分照射中间电池片,较小部分照射两侧电池片,连续调节激光器的工作电流,分别测出不同电流(即不同激光功率密度)时电池组的短路电流 I_s 和开路电压 V_{∞} 。计算出此光强均匀度情况下 GaAs 电池组的光电转换效率。第二种方法:将光纤输出的激光通过非球面镜系统对光强进行简单匀化处理,在距光纤输出端口 2 m 处截面光斑光强分布如图 3(b)所示,实验中测得此时光强均匀度约为 66.3%。采用与第一种方法类似的步骤,先测出此时激光器工作电流-光功率密度关系和光强均匀度。然后换上光电池组件,分别测出不同电流(即不同激光功率密度)时电池组的短路电流 I_s 和开路电压 V_{∞} 。计算出此光强均匀度情况下 GaAs 电池组的光电转换效率。第三种方法:将激光器直接输出的线阵光束通过光楔-曲面镜-棱镜组成的光强均匀化装置进行均匀化处理,在距光纤输出端口 2 m 处截面光斑光强分布如图 3(c)所示,实验中测得此时光强均匀度约为 78.9%。仍然是先测出此时激光器工作电流-光功率密度关系和光强均匀度。再换上

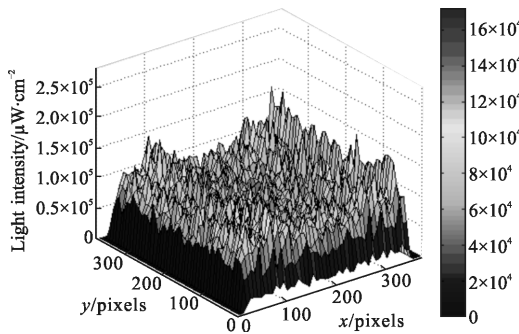
光电池组件,分别测出不同电流(即不同激光功率密度)时电池组的短路电流 I_s 和开路电压 V_{oc} 。计算出此光强均匀度情况下 GaAs 电池组的光电转换效率。



(a) 均匀度为 50.9%
(a) Evenness is 50.9%



(b) 均匀度为 66.3%
(b) Evenness is 66.3%



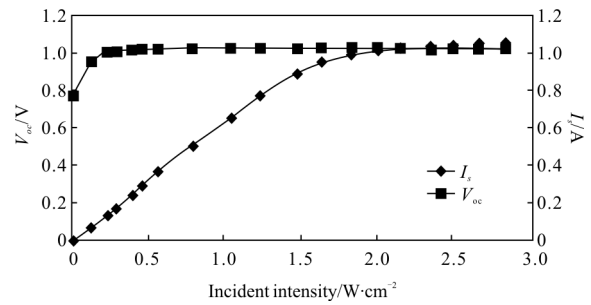
(c) 均匀度为 78.9%
(c) Evenness is 78.9%

图 3 1.5 μm 处截面光斑的光强分布

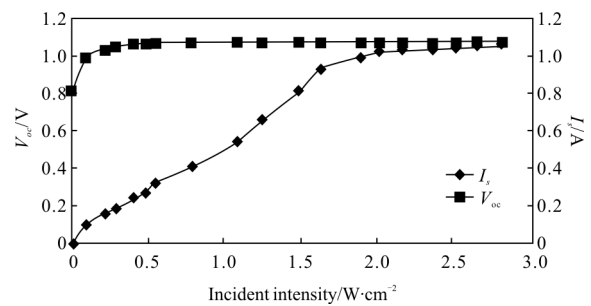
Fig.3 Light intensity distribution of cross section at 1.5 μm

实验中测得了单结 GaAs 光电池组输出端的开路电压和短路电流随激光强度的变化曲线如图 4(a)~(c)所示。由图可知对于三种光强均匀度不同的激光,光电池的开路电压随激光强度变化较小,数值稳定在 1 V 左右,短路电流开始随着入射光强的增强线性增加,当光强达到吸收阈值后,短路电流

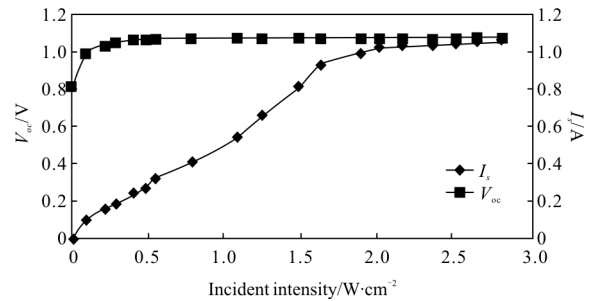
趋于饱和。



(a) 均匀度为 50.9%
(a) Evenness is 50.9%



(b) 均匀度为 66.3%
(b) Evenness is 66.3%



(c) 均匀度为 78.9%
(c) Evenness is 78.9%

图 4 单结 GaAs 光电池输出开路电压/短路电流随激光强度的变化关系

Fig.4 V_{oc}/I_s of the single junction GaAs photovoltaic cell versus incident intensity

将测得数据代入公式(6)中,即可得到不同光强均匀度下该 GaAs 电池组的光电转换效率随激光强度的变化关系,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,光电池的光电转换效率随光强均匀度的不同而变化:当光强均匀度分别为 50.9%、66.3%和 78.9%时,GaAs 电池的最大转换效率分别为 57.9%、62.4%和 66.1%。上述结果可由热

斑效应的机理来解释：当非均匀的激光束照射到光电池表面时,根据公式(4)可知,处于光强较强处的光电池负载较小,能量转换效率正常;而处于弱光强激光照射下的光电池由于 PN 结反向,相当于在电路中接入一个大的负载电阻,光电转换产生的电流通过此负载时发热,电能转换为热能,这不仅会降低电池组的整体转换效率,还将导致光电池本身温度升高,极端情况下甚至会使整个系统损坏。

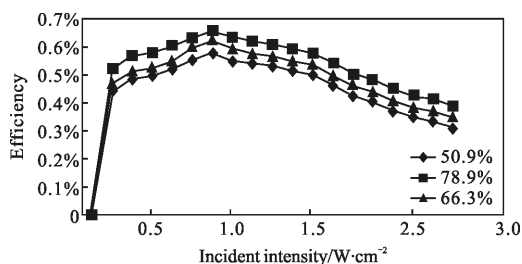


图 5 GaAs 光电池组能量转换效率随平均激光强度的变化关系

Fig.5 Relationship between the energy conversion efficiency and the average laser intensity in the GaAs photovoltaic cells

3 结 论

针对GaAs 电池的光电能量转换过程,通过等效电路理论分析了光强均匀度对光电池转换效率的影响。在此基础上,设计了一套实验方案,采用波长为 808 nm 的半导体激光束作光源,实际测量了三片光电池串联使用时,处于不同光强均匀度激光照射下的转换效率。结果表明,当照射到电池表面的激光均匀度不同时,电池组的最大转换效率差距很大。激光束均匀度越差,GaAs 电池组的光电转换效率越低。同时,不均匀光束照射对电池组带来的影响不仅是转换效率的下降,还会使整个系统发热,严重的甚至会导致系统损坏,故光强均匀度是能量传输系统中必须要考虑的一个重要因素,该研究结果对于激光无线能量传输技术的应用具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] Blackwell T. Recent demonstration of laser power beaming at DFRC and MSFC[C]//AIP Conference on Beamed Energy Propulsion, 2005: 73-85.

[2] George T, Tobias K, Ben S. High power semiconductor laser cheer the United State light beam transmission competitions [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(10): 64-66.

[3] Han Qijin, Fu Qiaoyan, Zhang Xuewen, et al. High-frequency radiometric calibration for wide field-of-view sensor of GF-1 satellite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1707-1714. (in Chinese)

[4] 韩启金,傅俏燕,张学文,等. 高分一号卫星宽视场成像仪的高频次辐射定标 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1707-1714.

[4] Li Bing, Sun Bin, Chen Lei, et al. Application of laser displacement sensor to free-form surface measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1939-1947. (in Chinese)

[5] 李兵,孙彬,陈磊,等. 激光位移传感器在自由曲面测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 2015,23(7): 1939-1947.

[5] Yang Peng, Yang Yannan. The research of monocrystalline silicon solar cells efficiency under laser [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 696-699. (in Chinese)

[6] 杨鹏,杨雁南. 激光辐照单晶硅电池转换效率的研究[J]. *激光技术*, 2012, 36(5): 696-699.

[6] Qiao Liang, Yang Yannan. The experimental research of laser wireless power transmission efficiency[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(5): 590-594. (in Chinese)

[7] 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.

[7] Tian Jinrong, Song Yanrong, Wang Li. Error analysis of peak power formula in pulsed lasers [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 253-259. (in Chinese)

[8] 田金荣,宋晏蓉,王丽. 常用激光峰值功率公式误差分析 [J]. *中国光学*, 2014, 7(2): 253-259 .

[8] Liu Xiaoguang, Hua Wenshen. Experimental investigations of laser intensity and temperature dependence of single crystal silicon photovoltaic cell parameters [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0802011. (in Chinese)

[9] 刘晓光,华文深. 激光辐照单晶硅光伏电池输出特性的实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0802011.

[9] Xia Lei, Han Xudong, Shao Junfeng. Laser beam combination accuracy of wavelength multiplexing[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 801-807. (in Chinese)

[10] 夏蕾,韩旭东,邵俊峰. 激光波长合束精度研究[J]. *中国光学*, 2014, 7(5): 801-807.

[10] Xing Shasha, Ran Yinghua, Jiang Haibo, et al. Illumination mode conversion system design based on micromirror array in lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (11): 1111002. (in Chinese)

[11] 邢莎莎,冉英华,江海波,等. 基于微反射镜阵列的光刻照明模式变换系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1111002.

[11] Ye Rui. The simulation of hot-spot effect and output

- characteristics of PV array[J]. *Electronic Test*, 2014, 4: 35–38
- [12] Li Songli, Zhang Jun. Investigation of test method of hot-spot endurance of PV module[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2013, 37(5): 778–780. (in Chinese)
- 李松丽, 张俊. 光伏组件热斑耐久试验方法探讨 [J]. 电源技术, 2013, 37(5): 778–780.
- [13] Marcus Staude. Guideline for interpretation and classification of thermographic images [C]//9th International Laser Processing and System Conference, 2014.
- [14] Shao Junfeng, Guo Jin, Wang Tingfeng. Theoretical research on dynamics of femto-second laser ablation crystal silicon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (8): 2419–2424. (in Chinese)
- 邵俊峰, 郭劲, 王挺峰. 飞秒激光与硅的相互作用过程理论研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2419–2424.
- [15] Wang Zhenbao, Wu Yong, Yang Pengling, et al. Numerical simulation and experiment on temperature fields distribution of aluminum target under intensive laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2061–2065. (in Chinese)
- 王振宝, 吴勇, 杨鹏翎, 等. 强激光辐照铝靶温度分布数值模拟及实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2061–2065.
- [16] Zhao Nan, Sun Xueping. Properties test of photocell [J]. *Information Technology*, 2012, 10: 134–136. (in Chinese)
- 赵楠, 孙雪萍. 光电池基本特性的测定 [J]. 信息技术, 2012, 10: 134–136.