

连续激光对三结 GaAs 电池的损伤效应

周广龙¹, 徐建明², 陆 健¹, 李广济¹, 张宏超¹

¹南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094;

²上海空间电源研究所, 上海 200245

摘要 在空气中和真空中, 利用波长为 1070 nm 的连续(CW)激光辐照三结砷化镓(GaAs)太阳电池, 通过测试激光辐照前后电池的电流-电压曲线, 并利用激光诱导电流(LBIC)成像系统和 X 射线光电子能谱仪(XPS), 研究了三结 GaAs 太阳电池的损伤情况。结果表明, 当激光功率密度为 8.4 W/cm²、辐照时间为 10 s 时, 在空气中, 底电池 Ge 熔融短路; 在真空中, 顶电池 Ga_{0.5}In_{0.5}P 和底电池 Ge 均发生短路, 说明三结 GaAs 太阳电池的底电池最容易受到破坏, 且电池在真空中比在空气中更容易受到损伤。该研究结果可为三结 GaAs 太阳电池的激光无线能量传输和损伤机理的研究提供一定的参考。

关键词 激光光学; 激光损伤; 三结砷化镓太阳电池; 激光诱导电流成像; X 射线光电子能谱仪

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.111412

Irradiation Effect of Continuous-Wave Laser on Triple-Junction GaAs Solar Cells

Zhou Guanglong¹, Xu Jianming², Lu Jian¹, Li Guangji¹, Zhang Hongchao¹

¹College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200245, China

Abstract In the air and the vacuum, triple-junction gallium arsenide (GaAs) solar cells are irradiated by the 1070 nm continuous-wave (CW) laser and the current-voltage curves of cells before and after laser irradiation are tested. By using the laser beam induced current (LBIC) measuring system and the X-ray photoelectron spectrometer (XPS), the damage situations of triple-junction GaAs solar cells are analyzed. The results show that, when the laser power density is 8.4 W/cm² and the irradiation time is 10 s, the bottom-cell Ge is fused and short-circuited in the air, and the top-cell Ga_{0.5}In_{0.5}P and the bottom-cell Ge are both short-circuited in the vacuum, which means the bottom-cell of triple-junction GaAs solar cells is the most easily damaged part and the cell is easier to be destroyed in the vacuum than in the air. These study results can provide references for the research on laser wireless energy transmission and the laser damage mechanisms of triple-junction GaAs solar cells.

Key words laser optics; laser damage; triple-junction gallium arsenide solar cell; laser beam induced current imaging; X-ray photoelectron spectrometer

OCIS codes 140.3330; 240.0310; 350.6050

1 引言

三结砷化镓(GaAs)太阳电池具有光电转换效率高、温度系数小、抗辐射能力强等特点, 被广泛应用于空间能源系统^[1-2]。但当人造卫星绕至地球的阴影区时, 太阳电池便无法提供电能, 而利用激光对其进行超远距离能量传输, 可维持其工作。当激光能量过大时, 电池温度升高, 影响电池的光电转换效率, 甚至造成损

收稿日期: 2017-06-30; **收到修改稿日期:** 2017-07-05

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST20161113)

作者简介: 周广龙(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与物质相关作用方面的研究。E-mail: 424437445@qq.com

导师简介: 张宏超(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光与物质相关作用方面的研究。

E-mail: hongchao@njust.edu.cn(通信联系人)

伤^[3]。因此,开展激光对太阳能电池损伤效应的研究有着重要的意义。

1994年,Jain^[4]利用脉冲激光研究了硅太阳能电池和GaAs太阳能电池的光电性能。1997年,Yugami等^[5]在地面上进行了激光能量的无线传输实验。2006年,Steinsiek^[6]利用激光辐照太阳能电池,成功驱动了机器人、风筝以及电梯。国内的相关研究主要集中在激光辐照太阳能电池的损伤机理。陆建等^[7]对大功率激光对材料的相互作用机理进行了研究。2008年,姜楠等^[8]利用波段外脉冲激光对锗材料进行了热冲击,发现热应力损伤占据主导地位并且主要集中在光斑中心区域,体现为压应力损伤。2011年,邱冬冬等^[9]对比了连续(CW)激光和脉冲激光对单晶硅太阳能电池和GaAs太阳能电池的损伤效应,发现CW激光对太阳能电池的损伤主要表现为热熔损伤,而脉冲激光对太阳能电池的损伤主要表现为热力损伤。2014年,田秀芹等^[10]研究了飞秒激光对硅和GaAs太阳能电池的损伤效应和聚光效应,发现相对于相同波长的CW激光,在飞秒激光照射下,GaAs太阳能电池不仅有更高的损伤阈值,而且有更高的转换效率。2017年,杨欢等^[11]在真空中用不同功率密度的激光辐照三结GaAs太阳能电池,得出了激光功率密度、激光辐照时间与电池中心温度、电池输出性能的关系。目前,对太阳能电池激光损伤的研究,主要集中在脉冲激光和CW激光辐照晶体硅太阳能电池、单结和三结GaAs太阳能电池方面,并以激光强度与电池电性能的关系、电池的损伤阈值以及如何提高电池的转换效率的研究为主。然而,关于空气和真空中三结GaAs太阳能电池各节的激光损伤情况的对比研究却鲜有报道。

本文通过对比辐照前后的电流-电压($I-V$)曲线,结合激光诱导电流(LBIC)成像系统检测、X射线光电子能谱仪(XPS)测试手段,分析了不同环境中1070 nm连续光纤激光辐照三结GaAs太阳能电池后子电池的损伤情况。

2 实 验

2.1 三结GaAs太阳能电池结构参数

实验样品为三结GaAs太阳能电池,由顶电池 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 、中电池GaAs、底电池Ge组成,对应的禁带宽度分别为1.85,1.42,0.65 eV,对应的响应光谱范围分别为300~670 nm,500~920 nm,800~1800 nm,采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术制备,样品面积为 3.6 cm^2 。

2.2 三结GaAs太阳能电池激光损伤实验装置

实验系统包括连续光纤激光器、激光扩束装置和真空设备,如图1所示。连续光纤激光器输出的光束经过由透镜 L_1 和 L_2 组成的扩束装置扩束后,再依次通过可调光阑和真空腔的光学窗口,辐照在真空腔室内的三结GaAs太阳能电池样品上。其中,光纤连续激光器输出波长为1070 nm,输出模式为单模输出,最大输出功率为200 W,光斑直径为7 mm,输出功率连续可调。凸透镜 L_1 和 L_2 的直径分别为25 mm和40 mm,焦距分别为50 mm和150 mm。光阑250 mm范围内连续可调,调节光阑使激光光斑直径小于样品尺寸^[8]。辐射到电池表面的激光功率由功率计测量。真空腔内的真空度最低可达 10^{-3} Pa 。

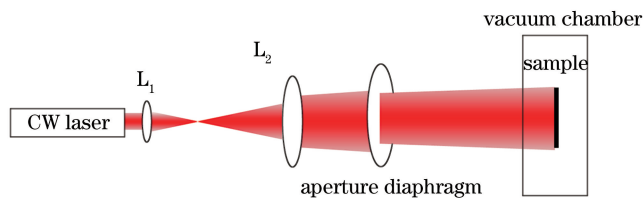


图1 激光辐照电池实验的光路图

Fig. 1 Beam path diagram in experiment of laser irradiation of solar cells

2.3 三结GaAs太阳能电池损伤情况表征

为了得到三结GaAs太阳能电池各节的损伤情况,通过太阳能电池 $I-V$ 曲线、LBIC成像系统和XPS三种测试手段对其损伤情况进行分析和研究。

在真空和室温条件下,利用源表获取激光辐照三结GaAs太阳能电池前后的 $I-V$ 曲线。利用 $I-V$ 曲线,可得到电池的电性能参数,包括开路电压(V_{oc})、短路电流(I_{sc})、最大输出功率(P_{max})和填充因子(F_F),结合激

光输入功率可求得电池的光电转换效率(η)^[12]。

LBIC 成像系统是一种对半导体材料结构和光电性能以及缺陷进行高分辨率无损检测的方法。利用 LBIC 成像系统可检测三结 GaAs 太阳电池中顶电池的光致电流分布情况。实验中 LBIC 成像系统的探测波长为 532 nm, 功率为 30 mW, 分辨率为 5 μm 。由于三结 GaAs 太阳电池顶电池的响应波段为 300~670 nm, 在 532 nm 处呈现高量子效率^[2,12], 因而利用 532 nm 的探测光可以有效地对顶电池光致电流分布进行成像, 对比激光辐照前后的扫描图像, 可得到顶电池的损伤情况。

利用 XPS 可以准确地分析表面元素的化学态, 分析和鉴定材料表面组分, 并定量分析表面元素的含量。利用 XPS 测试激光辐照后电池背面析出元素及其价态变化, 并分析析出物质的组成成分, 可判断激光辐照后电池的损伤情况。XPS 探测光斑大小为 200 μm \times 250 μm , 基准峰选取 C1s(结合能 $E_b = 284.8$ eV)。

3 实验结果与分析

3.1 空气中三结 GaAs 太阳电池激光损伤

空气中激光辐照三结 GaAs 太阳电池前后测量得到的 I - V 曲线如图 2 所示。从图 2(a)可以看出, 当激光功率密度为 5 W/cm^2 时, 激光辐照后开路电压损失 15.5 mV, 短路电流仅下降 0.3 mA, 激光辐照前后电池的 I - V 曲线基本重合, 显示电池电性能受到的影响很小, 这表明电池在受到功率密度为 5 W/cm^2 的激光辐照 10 s 时, 电池没有明显的损伤。从图 2(b)可以得出, 当激光功率密度增大至 8.4 W/cm^2 时, 激光辐照后, 电池开路电压损失 9.5%, 短路电流损失 1.4%, 填充因子减小 7.2%, 光电转换效率减小 7.1%, 说明电池电性能受到了相对较大的影响。具体的电学参数变化见表 1。

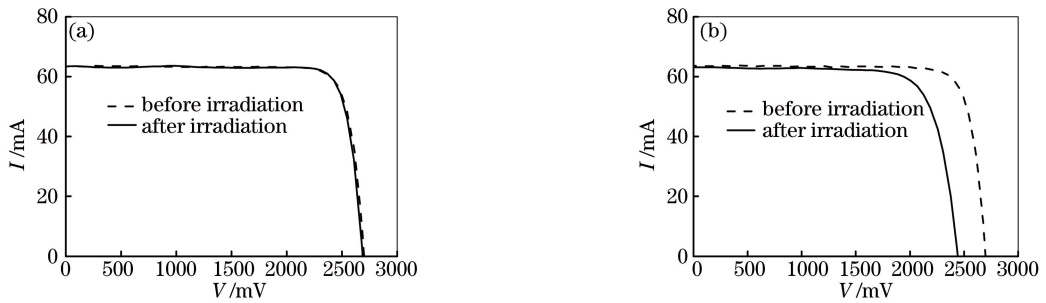


图 2 空气中不同功率密度的 CW 激光辐照电池前后的 I - V 曲线。(a) 5 W/cm^2 ; (b) 8.4 W/cm^2

Fig. 2 I - V curves of solar cells before and after CW laser irradiation under different power densities in air.

(a) 5 W/cm^2 ; (b) 8.4 W/cm^2

表 1 空气中功率密度为 8.4 W/cm^2 的 CW 激光辐照电池前后电池的电性能对比

Table 1 Comparison of electrical properties of solar cells before and after CW laser irradiation under power density of 8.4 W/cm^2 in air

Condition	V_{oc}/mV	I_{sc}/mA	$F_F/\%$	$\eta/\%$
Before irradiation	2697.5	63.9	0.83	28.95
After irradiation	2441.0	63.0	0.77	23.91
Percentage of decline /%	9.5	1.4	7.2	7.1

为了分析电池电性能下降的原因, 采用 LBIC 成像系统和 XPS 测试手段对损伤区域进行进一步的研究, 激光辐照后电池的损伤形貌图如图 3 所示。图 3(a)显示电池前表面有部分区域凹陷, 但颜色无显著改变。图 3(b)表明电池背面已熔融烧蚀变色。在图 3(c)中, 蓝色区域光致电流为零, 是电池的焊接电极; 红色区域光致电流较高, 是无损伤区域; 黄色和黄绿色区域光致电流相对较小, 主要是电池表面栅线的部分遮挡和顶电池损伤这两类因素引起的。经测量, 顶电池损坏的区域面积约占总体面积的 3%。三结 GaAs 太阳电池表面栅线将顶电池分割成了许多相互并联的子电池, 占总面积不足 3% 的损伤区域处损失的微弱电压可以由其他未受损的子电池“分担”。结合电池背面烧蚀情况, 推测损失的 256 mV 开路电压是由底电池 Ge 和中电池 GaAs 的损伤导致的。

对图 3(b)所示损伤中心 A 处 Ge3d 电子的 XPS 谱分峰后,进行高斯拟合,结果如图 4 所示。可以看出,在 29.4 eV 和 32.5 eV 处存在两个子峰,分别对应于 Ge 和 GeO₂ 的 Ge3d 峰^[13-15]。结果表明,衬底 Ge 在激光作用下熔融后析出了表面,其中部分 Ge 与空气发生氧化反应,生成了 GeO₂。伴随着衬底 Ge 的熔融,在高温影响下底电池的 P-N 结发生熔化,底电池发生短路。

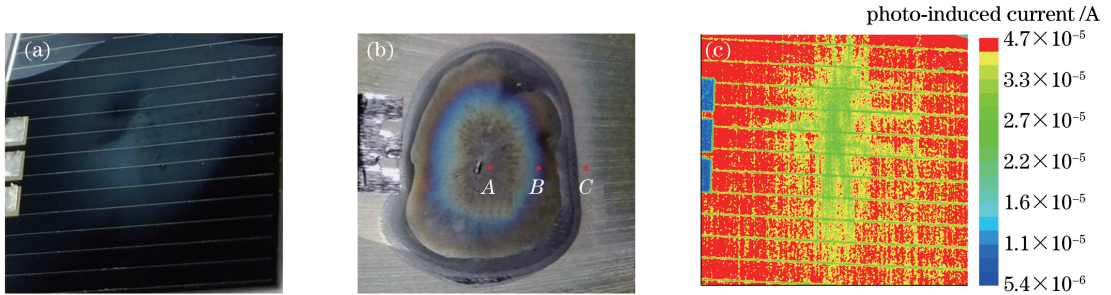


图 3 激光辐照后电池的损伤形貌。(a)正面图;(b)背面图;(c)顶电池 LBIC 测试图

Fig. 3 Damage morphologies of solar cells after laser irradiation. (a) Front view; (b) rear view; (c) LBIC measured image of top cell

进一步在图 3(b)所示损伤中心 A 点、蓝色过渡区 B 点、损伤边缘 C 点检测是否有 As 元素,测试的电子包括 O1s、Ge3d、Cl1s、As3d、Ag3d 和 Ga3d。结果表明,在 A、B、C 三点处,As3d 电子的相对含量分别是 4.0%,3.9%,3.5%,说明有 GaAs 发生热解,导致 As 元素析出表面。Ge 的禁带宽度为 0.65 eV,底电池能够提供的开路电压约为 0.25 V^[16],正好对应损失的开路电压,故这里检测到的 As 元素来自串联底电池和中电池的 GaAs 隧穿结,较厚的中电池的 P-N 结结区并没有明显损坏。

以上的测试和分析结果表明,三结 GaAs 太阳电池的底电池损坏情况最严重。这是因为常温下顶电池 Ga_{0.5}In_{0.5}P 层与中电池 GaAs 层对 1070 nm 的激光具有很高的透过率,而底电池 Ge 本征吸收 1070 nm 激光,被吸收的光子的能量中大于 Ge 禁带宽度的部分,传递给晶格热量使电池本身温度升高,所以底电池最易损坏。受到功率密度为 8.4 W/cm² 的激光辐照 10 s 后,顶电池有少部分区域光电性能下降,中电池未受损,衬底 Ge 发生熔融并且底电池的 P-N 结损坏发生短路,导致开路电压损失 256 mV。

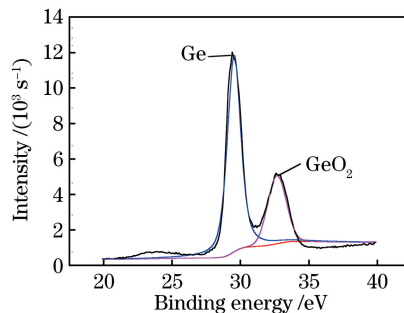


图 4 A 点 Ge3d 的分解拟合图

Fig. 4 Fitting spectra of Ge3d after decomposition at point A

3.2 真空中三结 GaAs 太阳电池激光损伤

图 5 所示为真空中激光辐照三结 GaAs 太阳电池前后的 $I-V$ 曲线。从图 5(a)可以看出,当激光功率密度为 5 W/cm² 时,三结 GaAs 太阳电池的短路电流损失 2.9 mA,减小 4.3%;开路电压损失 13 mV,减小不到 1%。这是由于相对于在空气中,真空中缺少热对流,温度升高更多,引起电池轻微损伤,载流子复合几率上升,暗电流增加,导致电池短路电流和开路电压都稍有减小。这表明相对于在空气中,在真空中功率密度为 5 W/cm² 的激光辐照三结 GaAs 太阳电池 10 s,电池存在轻微损伤,其电性能虽然轻微下降,但仍能较好地工作。从图 5(b)可以看出,受功率密度为 8.4 W/cm² 的激光辐照后,电池的开路电压损失 72.5%,短路电流损失 2.5%,填充因子减小 24.6%,光电转换效率减小 81.7%,表明电池电性能大幅度下降,具体的电学参数变化见表 2。

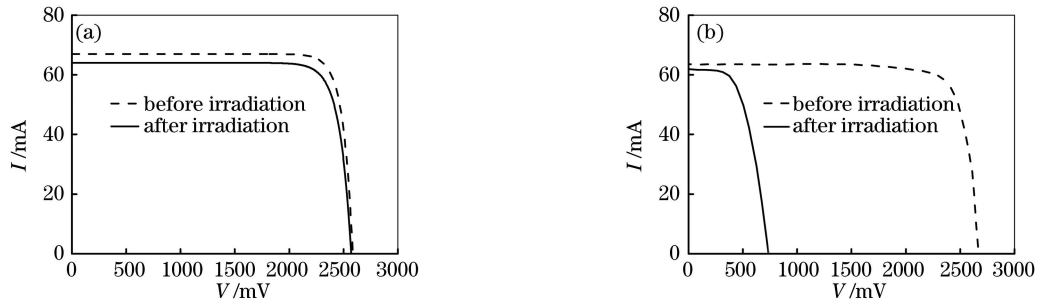


图 5 真空中不同功率密度 CW 激光辐照电池前后的 I - V 曲线。(a) 5 W/cm^2 ; (b) 8.4 W/cm^2

Fig. 5 I - V curves of solar cells before and after CW laser irradiation under different power densities in vacuum.

(a) 5 W/cm^2 ; (b) 8.4 W/cm^2

表 2 真空中功率密度为 8.4 W/cm^2 的 CW 激光辐照电池前后电池的电性能对比

Table 2 Comparison of electrical properties of solar cells before and after CW laser irradiation under power density of 8.4 W/cm^2 in vacuum

Condition	V_{oc}/mV	I_{sc}/mA	$F_F/\%$	$\eta/\%$
Before irradiation	2676.3	63.5	0.81	27.89
After irradiation	736.0	61.9	0.61	5.1
Percentage of decline /%	72.5	2.5	24.6	81.7

为了分析电池电性能下降的原因,同样采用 LBIC 和 XPS 测试手段对损伤区域进行进一步研究,激光辐照后电池的损伤形貌图如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,电池正面没有因激光辐照而发生形貌与颜色的变化。从图 6(b)可以看出,电池背面已经熔融,有白色物质析出,背电极被覆盖。图 6(c)反映了电池损伤后顶电池的光致电流的分布情况,整个电池表面光致电流非常小,这说明顶电池已经发生大面积短路。顶电池发生短路,禁带宽度为 1.85 eV 的顶电池提供的开路电压约为 $1.45 \text{ V}^{[17]}$,低于损失的开路电压(1.94 V),说明还有另外的子电池发生损伤。结合顶电池大面积的短路和电池背面的熔融情况,推测底电池和中电池也都受损。

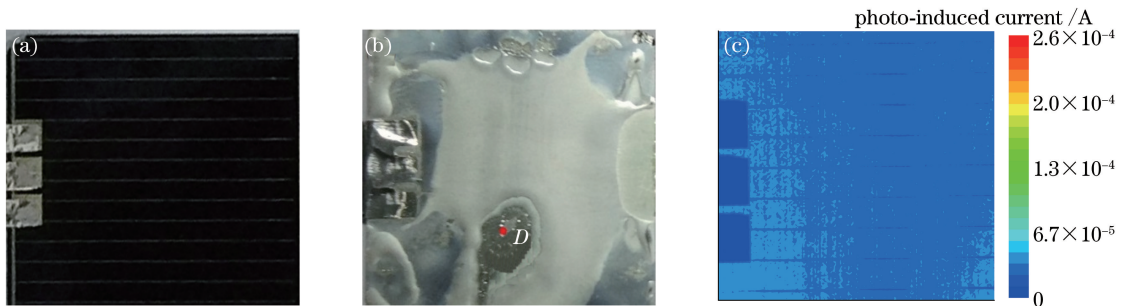


图 6 激光辐照后电池的损伤形貌。(a) 正面图; (b) 背面图; (c) 顶电池 LBIC 测试图

Fig. 6 Damage morphologies of solar cells after laser irradiation. (a) Front view; (b) rear view;

(c) LBIC measured image of top cell

对图 6(b)所示 D 点处 $\text{Ge}3d$ 电子的 XPS 谱分析峰后,进行高斯拟合,结果如图 7 所示。可以看出,在 29.4 eV 处有 1 个子峰,对应于 Ge 的 $\text{Ge}3d$ 峰。说明衬底 Ge 在激光作用下熔融后析出了表面,同时底电池 P-N 结发生损坏并出现短路。

顶电池和底电池都发生短路,但两者提供的开压约为 $1.7 \text{ V}^{[17]}$,仍然低于损失的 1.94 V 的开路电压,说明中电池也存在部分损伤。在图 6(b)所示 D 点处进一步测试是否有 As 元素的存在,测试的电子包括 $\text{Cl}s$ 、 $\text{Ga}3d$ 、 $\text{Ag}3d$ 、 $\text{Ge}3d$ 和 $\text{As}3d$ 。结果表明, As 元素的原子数分数为 3.1% ,说明有 GaAs 发生热解,导致 As 元素析出表面。由于真空中缺少热对流,激光辐照导致的温升大于空气中的温升,结合损失的开路电压,认为此时检测到的 As 元素绝大部分来自于中电池 P-N 结中的 P 型 GaAs 层,致使中电池 P-N 结质量下降。

以上的测试和分析结果表明,三结 GaAs 太阳能电池的底电池和顶电池损坏严重。底电池本征吸收

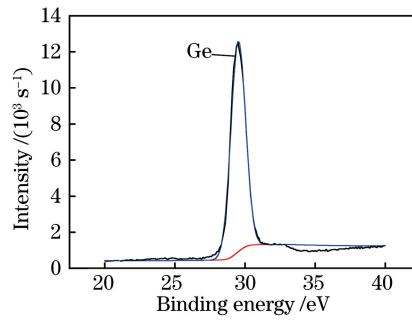


图7 真空中D点处Ge3d的分解拟合图

Fig. 7 Fitting spectra of Ge3d after decomposition at point D in vacuum

1070 nm的激光,故底电池最易受损。真空中激光辐照电池产生的热量只能在电池中传递,随着辐照时间的增加,热量不断积累,使底电池和顶电池的P-N结发生损伤并短路,中电池受到热损伤,GaAs发生热解,P-N结结区受到破坏。可以得出,在真空中三结GaAs太阳电池受到功率密度为 8.4 W/cm^2 的激光辐照10 s后,顶电池和底电池都短路,中电池受到部分损伤。

4 结 论

CW 光纤激光辐照三结GaAs太阳电池10 s,当功率密度为 5 W/cm^2 时,在空气中电池电性能受到的影响很小,电池没有明显损伤;在真空中电池的电性能轻微下降,电池有轻微损伤。当激光的功率密度增加至 8.4 W/cm^2 时,在空气中底电池发生短路,顶电池有少部分区域光电性能下降,中电池未受损,三结GaAs太阳电池的开路电压为2.4 V;在真空中底电池和顶电池都发生短路,中电池部分受损,三结GaAs太阳电池的开路电压不足1 V。该研究结果对三结GaAs太阳电池的激光无线能量传输和激光损伤机理的研究具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Zhang Zhongwei, Lu Jianfeng, Chi Weiying, *et al.*. Technique development and prospects analysis of GaAs solar cell [J]. Aerospace Shanghai, 2003, 20(3): 33-38.
张忠卫, 陆剑峰, 池卫英, 等. 砷化镓太阳电池技术的进展与前景[J]. 上海航天, 2003, 20(3): 33-38.
- [2] Fang Zujie, Chen Gaoting, Ye Qing. Progress of photovoltaic electric power generation[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 5-14.
方祖捷, 陈高庭, 叶青. 太阳能发电技术的研究进展[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 5-14.
- [3] Qiu Dongdong, Wang Rui, Cheng Xiang'ai, *et al.*. Mechanisms research on continuous wave laser induced damage to solar cells[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302006.
邱冬冬, 王睿, 程湘爱, 等. 连续激光对太阳能电池的损伤机理研究[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302006.
- [4] Jain R K. Calculated performance of indium phosphide solar cells under monochromatic illumination [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1993, 40(10): 1893-1895.
- [5] 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, 1: 625-630.
- [6] Steinsiek F. Wireless power transmission experiment as an early contribution to planetary exploration missions [C]. 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law, 2003: R.3.06.
- [7] Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. A research advance on the interaction mechanism of high-power laser and materials[J]. Laser Technology, 1996, 20(3): 181-184.
陆建, 倪晓武, 贺安之. 高功率激光与材料相互作用机理研究进展[J]. 激光技术, 1996, 20(3): 181-184.
- [8] Jiang Nan, Niu Yanxiong, Zhang Shulian, *et al.*. Numerical simulation of thermal shock effect on germanium induced by out-of-band pulsed-laser[J]. Infrared & Laser Engineering, 2008, 37(3): 481-484.

- 姜楠, 牛燕雄, 张书练, 等. 波段外脉冲激光对锗材料热冲击效应的数值研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 481-484.
- [9] Qiu Dongdong, Jin Huasong, Liu Siliang, *et al.* Damage contrast of solar cells induced by short-pulse laser and CW laser[J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(2): 112-116.
邱冬冬, 金华松, 刘斯亮, 等. 短脉冲和连续激光对太阳能电池的损伤对比[J]. 光电子技术, 2011, 31(2): 112-116.
- [10] Tian Xiuqin. Performance research of silicon/gallium arsenide solar cells under femtosecond high power laser illumination[D]. Changsha: Central South University, 2014.
田秀芹. 飞秒激光照射下硅/砷化镓太阳能电池的光电特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [11] Yang Huan, Lu Jian, Zhou Dayong, *et al.* Experimental study of 1070 nm CW laser irradiation on three-junction GaAs solar cells[J]. Laser Technology, 2017, 41(3): 318-321.
杨欢, 陆健, 周大勇, 等. 1070 nm 连续激光辐照三结 GaAs 太阳电池的实验研究[J]. 激光技术, 2017, 41(3): 318-321.
- [12] Shanghai Institute of Space Power-Sources. Physical power technology[M]. Beijing: Science Press, 2015.
上海空间电源研究所. 物理电源技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [13] Xu Zhenjia. Detection and analysis of semiconductor[M]. Beijing: Science Press, 2007.
许振嘉. 半导体的检测与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [14] Wang Jianqi, Wu Wenhui, Feng Daming. An introduction to electronic spectroscopy (XPS/XAES/UPS) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1992.
王建琪, 吴文辉, 冯大明. 电子能谱学(XPS/XAES/UPS)引论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- [15] Cao T, Bao X M, Yan F, *et al.* Violet light-emission from Ge⁺-implanted SiO₂ films on Si substrate[J]. Acta Physica Sinica, 1997, 6(6): 466.
- [16] King R R, Law D C, Edmondson K M, *et al.* 40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(18): 183516.