

三结砷化镓太阳能电池真空连续激光损伤效应

唐道远¹, 徐建明¹, 李云鹏², 窦鹏程², 马宁华¹, 蒋 帅¹, 吴 敏¹

(1. 上海空间电源研究所 空间电源技术国家重点实验室, 上海 200245;

2. 西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘 要: 采用 1 315 nm 波长连续激光, 在真空环境下辐照三结砷化镓太阳能电池, 通过对比辐照前后电池 IV、QE 等表征数据, 研究三结砷化镓太阳能电池的损伤效应, 并对其损伤机理进行分析。结果表明: 当激光功率密度为 8 W/cm²、辐照时间为 60 s 时, 三结砷化镓太阳能电池辐照后电性能下降显著, 转化效率衰减超过 70%。损伤机理是在热损伤与应力损伤的综合作用下, 引起电池串联电阻(R_s)、并联电阻(R_{sh})的恶化, 且 R_{sh} 是衡量电池损坏的关键指标。该结果可以为三结砷化镓太阳能电池在激光损伤机理与无线能量传输方面的研究提供一定的参考。

关键词: 砷化镓; 太阳能电池; 真空; 激光; 损伤

中图分类号: TN 249; TM 914

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.02.007

Damage Effects of Tri-Junction GaAs Solar Cells Irradiated by Continuous-Wave Laser in Vacuum

TANG Daoyuan¹, XU Jianming¹, LI Yunpeng², DOU Pengcheng²,

MA Ninghua¹, JIANG Shuai¹, WU Min¹

(1.State Key Laboratory of Space Power-Sources Technology, Shanghai Institute of Space Power-Sources,

Shanghai 200245, China; 2.State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: The tri-junction gallium arsenide (GaAs) solar cells are irradiated by a continuous-wave laser with a wavelength of 1 315 nm in the vacuum. With comparisons of the characterization data such as the quantum efficiency (QE) and current-voltage (IV) parameters before and after irradiation, the damage effects of tri-junction GaAs solar cells are studied, and the mechanism is analyzed. The results show that when the laser power density is 8 W/cm² and the irradiation time is 60 s, the electrical properties of tri-junction GaAs solar cells after irradiation significantly decrease, and the conversion efficiency degradation is over 70%. This damage is a combined thermal and stress damage, causing the series (R_s) and parallel (R_{sh}) resistances of the cells to deteriorate. R_{sh} is a key indicator for the solar cell damage. These results can provide some references for the research on the laser damage mechanism and laser wireless energy transmission of tri-junction GaAs solar cells.

Key words: GaAs; solar cell; vacuum; laser; damage

0 引言

三结砷化镓(GaInP/GaAs/Ge)太阳能电池以其转化效率高、抗辐照能量强等特点,近年来作为主电源系统^[1-2]被广泛应用于各类航天器。当航天器运行至地球阴影区时,太阳能电池将无法工作,为此

设计三结砷化镓太阳能电池与激光电池相结合的全天时电池翼,即在光照区时三结砷化镓太阳能电池工作,而在阴影区时,利用激光照射激光电池进行远距离能量传输^[3-4]。当激光照射在三结砷化镓太阳能电池时,由于激光能量密度很高,会造成太阳能电池

收稿日期:2019-09-02; 修回日期:2019-12-27

基金项目:上海市青年科技英才扬帆计划资助项目(17YF1412500)

作者简介:唐道远(1984—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为太阳能电池新技术、空间太阳能电池损伤及防护等。



的损伤,因此,有必要就三结砷化镓太阳电池的激光损伤形式及机理进行分析。

近年来国内外研究指出,太阳电池激光辐照损伤的主要原因包括热应力损伤、热熔损伤^[5]、高温导致深能级缺陷增加以及掺杂离子再扩散^[6]等。目前对激光损伤的研究,主要是采用脉冲或连续激光,在空气环境下辐照硅、砷化镓等太阳电池,研究激光参数、电池性能及损伤阈值的关系。而对于在真空环境下,采用 1 315 nm 这一大气窗口的连续激光,针对三结砷化镓太阳电池器件结构的激光损伤过程性分析及损伤机理研究,目前尚未见公开报道。

本文采用 1 315 nm 波长的连续激光,模拟空间环境,在真空条件下辐照三结砷化镓太阳电池,开展了激光损伤效应研究。

1 实验

1.1 三结砷化镓太阳电池结构参数

实验样品为三结砷化镓太阳电池,制作工艺主要包括有源层 MOCVD 沉积、栅线及背电极蒸镀、抗辐照盖片粘合固化等。电池结构如图 1 所示,自上而下分别为抗辐照玻璃盖片、盖片胶、栅线、GaInP 顶电池、GaAs 中电池、Ge 底电池、背电极。顶、中、底三个子电池的带隙分别为 1.85、1.42、0.67 eV,所对应的响应光谱波段分别为 350~700 nm、700~880 nm、880~1 750 nm^[7]。

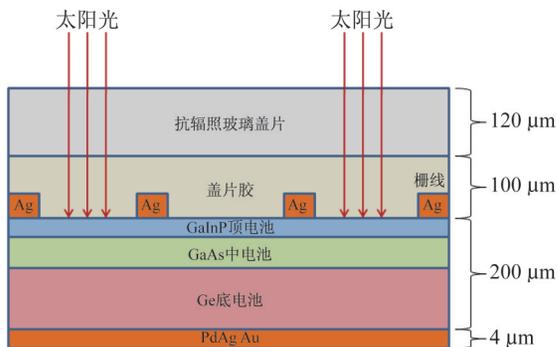


图 1 三结砷化镓太阳电池结构图

Fig.1 Structure diagram of tri-junction GaAs solar cell

1.2 激光辐照实验装置及损伤表征

实验系统包括连续式激光器、扩束装置、光阑、真空腔室、红外测温及开压检测系统等,如图 2 所

示。激光器的波长为 1 315 nm,光束经扩束及光阑后,透过真空腔室的玻璃窗口,照射在三结砷化镓太阳电池样品表面。

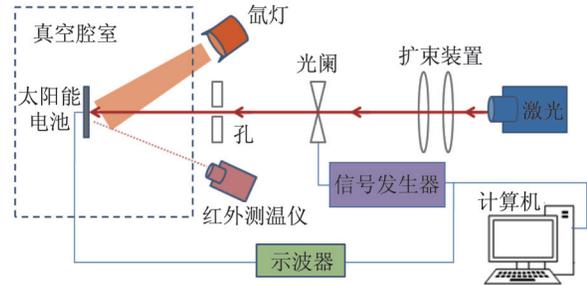
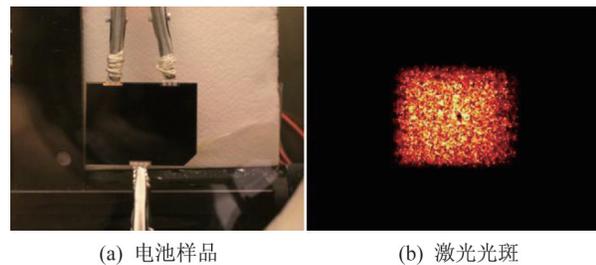


图 2 太阳电池真空激光辐照实验系统

Fig.2 Laser irradiation system of solar cells in the vacuum

调节光斑大小使其完全覆盖电池样品,如图 3 所示,采用功率计对激光功率值进行标定,辐照时真空度达到 10^{-3} Pa 以上,实时监测辐照过程中太阳电池开路电压及电池片温度变化。



(a) 电池样品

(b) 激光光斑

图 3 真空腔内电池样品及激光光斑

Fig.3 Solar cell sample in the vacuum chamber and laser spot

三结砷化镓太阳电池的激光损伤情况由实验前后标准 $I-V$ 电性能(AM0)、量子效率(QE)、SEM 表面形貌三种测试进行表征。

2 实验结果与分析

2.1 激光辐照中电池在线检测

选择 2、5、8 W/cm^2 3 个激光功率密度参数,固定辐照时间为 60 s,每个参数选取 2 个三结砷化镓太阳电池样品。

激光辐照过程中电池样品温度 T 的变化曲线(测温仪量程自 350 °C 起)如图 4 所示。温度曲线基本分为 3 个阶段,即温升段、热平衡段、降温段。在温升段,随功率密度增大,温升梯度增大显著;在热

平衡段,随功率密度增大,热平衡温度逐渐增加,3个功率密度分别对应420℃、620℃、670℃;在降温段,由于热源的消失,电池样品温度骤降。

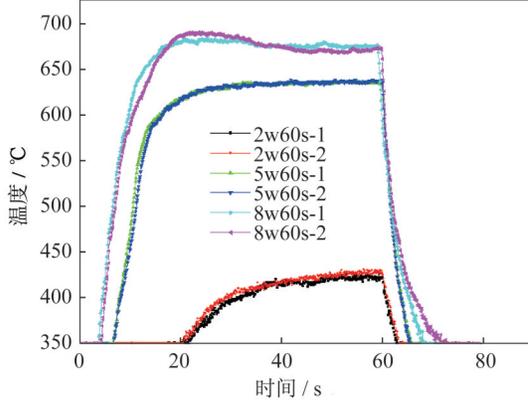


图4 辐照过程中电池样品温度变化曲线

Fig.4 Temperature change curves of the solar cell samples during irradiation

激光辐照过程中开路电压 V_{oc} 的变化曲线如图5所示,随着电池温度的升高, V_{oc} 迅速降低。

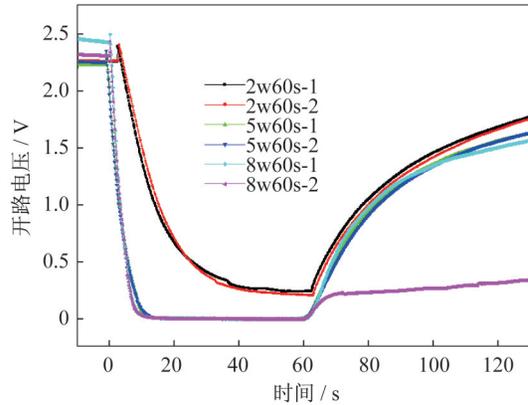


图5 辐照过程中电池样品开压变化曲线

Fig.5 Opening voltage change curves of the solar cell samples during irradiation

理想的PN结太阳能电池开路电压 V_{oc} 可表示为

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (1)$$

也可以写成

$$I_{sc} = I_0 \left(e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

当忽略小负数项时,该式可改写为

$$I_{sc} = AT^\gamma e^{-\frac{E_{g0}}{kT}} \cdot e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} \quad (3)$$

式中: A 与温度无关; E_{g0} 为 0°C 时电池半导体材料

的禁带宽度; γ 包含确定 I_0 的其余参数中与温度有关的因素,其数值通常在1~4范围内。

对该式求导,并考虑

$$V_{g0} = E_{g0}/q \quad (4)$$

可以得到

$$\frac{dI_{sc}}{dT} = A\gamma T^{\gamma-1} e^{\frac{q(V_{oc}-V_{g0})}{kT}} + AT^\gamma \left(\frac{q}{kT} \right) \cdot \left(\frac{dV_{oc}}{dT} - \frac{V_{oc}-V_{g0}}{T} \right) e^{\frac{q(V_{oc}-V_{g0})}{kT}} \quad (5)$$

忽略 $\frac{dI_{sc}}{dT}$ 项,得到开路电压随温度变化的公式为

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = - \frac{V_{g0} - V_{oc} + \gamma \left(\frac{kT}{q} \right)}{T} \quad (6)$$

可以看出,随着温度升高, V_{oc} 近似线性减小。更加精确的计算表明 GaInP 顶电池 $dV_{oc}/dT \approx -2.2 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$, GaAs 中电池 $dV_{oc}/dT \approx -2.0 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$, Ge 底电池 $dV_{oc}/dT \approx -1.8 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$ 。三结砷化镓太阳电池 $V_{triple} = V_t + V_m + V_b$, 因此, $dV_{oc}/dT \approx -6.0 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1[8-9]}$ 。由于三结砷化镓太阳电池样品 V_{oc} 在 2 600 mV 左右 (AM0, 25°C), 可以得到电池温度为 450°C 时, V_{oc} 趋近于 0 V。

实验结果也证实了 V_{oc} 随温度升高而降低的此近似线性的负温度系数。 $5 \text{ W}/\text{cm}^2$ 和 $8 \text{ W}/\text{cm}^2$ 2 个功率密度的电池样品,分别在辐照后 10 s 和 7 s 后,温度到达 450°C , V_{oc} 降为 0 V; $2 \text{ W}/\text{cm}^2$ 功率密度对应的电池样品,由于在辐照 60 s 内最高温度未超过 450°C , 因此 V_{oc} 的变化曲线与温度 T 曲线保持反向一致,最低值约为 0.2 V。辐照结束后, $2 \text{ W}/\text{cm}^2$ 和 $5 \text{ W}/\text{cm}^2$ 2 个功率密度对应的电池样品, V_{oc} 随着温度的降低而逐渐恢复; $8 \text{ W}/\text{cm}^2$ 功率密度对应的 2 个电池样品中,有 1 个电池样品 V_{oc} 发生明显衰减,无法恢复。

2.2 激光辐照后电池性能表征

真空激光辐照实验后电池样品的外观图片如图6所示。 $2 \text{ W}/\text{cm}^2$ 电池样品前后表面没有发生明显变化; $5 \text{ W}/\text{cm}^2$ 和 $8 \text{ W}/\text{cm}^2$ 2 个功率密度的电池样品,前后表面都有明显烧蚀的痕迹,这是由于盖片胶、背电极层在高温下发生热分解。虽然经模式变化光斑能量趋于均匀,但在电池表面激光能量还是呈现近高斯分布的特点,即中心区域能量密度更高,造成的热分解效应也更加明显。

图7为激光辐照后电池在 AM0 光谱下测试的

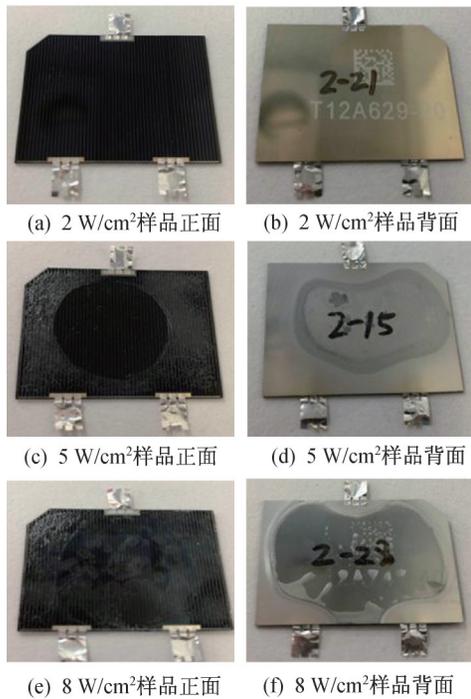


图 6 辐照后电池样品正背面外观

Fig.6 Front and back appearance of the solar cell samples after irradiation

标准 $I-V$ 曲线, 2 W/cm^2 电池样品 $I-V$ 性能与标准片比较没有明显的变化; 5 W/cm^2 和 8 W/cm^2 2 个功率密度的电池样品 $I-V$ 性能都发生了程度不同的衰减, 8 W/cm^2 有一个电池样品发生了明显损坏。

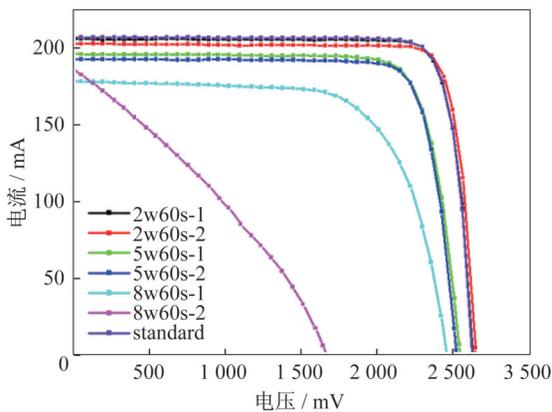


图 7 辐照后电池样品 $I-V$ 性能测试

Fig.7 $I-V$ parameters of solar cells after irradiation

各电池样品激光辐照实验后 $I-V$ 性能的相对衰降率见表 1。 2 W/cm^2 电池样品的各 $I-V$ 参数基本没有变化; 5 W/cm^2 电池样品的各 $I-V$ 参数均有一定程度的下降, 其中 V_m 、 I_m 衰降率均在 6% 左右, Eff 衰降率约 13% ; 8 W/cm^2 电池样品的各参数衰降进

一步扩大, V_m 、 I_m 衰降率均在 18% 左右, Eff 衰降率约 35% , 对于发生损坏的电池样品, V_{oc} 、 FF 衰降率大于 35% , Eff 衰降率大于 70% 。

表 1 辐照后电池样品 $I-V$ 参数相对衰降率

Tab.1 Relative $I-V$ degradation rates of the solar cell samples after irradiation %

样品	$D_{V_{oc}}$	$D_{I_{sc}}$	D_{V_m}	D_{I_m}	D_{FF}	D_{Eff}
2w60s-1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
2w60s-2	0.1	1.7	0.1	1.3	0.1	0.1
5w60s-1	2.9	4.1	6.7	5.7	5.0	12.9
5w60s-2	3.7	6.6	6.6	6.2	3.1	13.3
8w60s-1	5.2	12.9	18.9	18.7	18.1	34.7
8w60s-2	35.8	8.5	61.4	44.2	37.0	78.7

激光辐照实验后电池串联电阻 (R_s) 与并联电阻 (R_{sh}) 的测试数值如图 8 所示。 2 W/cm^2 和 5 W/cm^2 电池样品 R_s 、 R_{sh} 变化规律不明显; 8 W/cm^2 电池样品的 R_s 显著增大, R_{sh} 显著减少。特别是损坏的电池样品, R_{sh} 值只有 $11\ \Omega$, 与正常的电池样品比较降低了 2 个数量级。

图 9 和表 2 为辐照后电池样品 QE 测试结果。

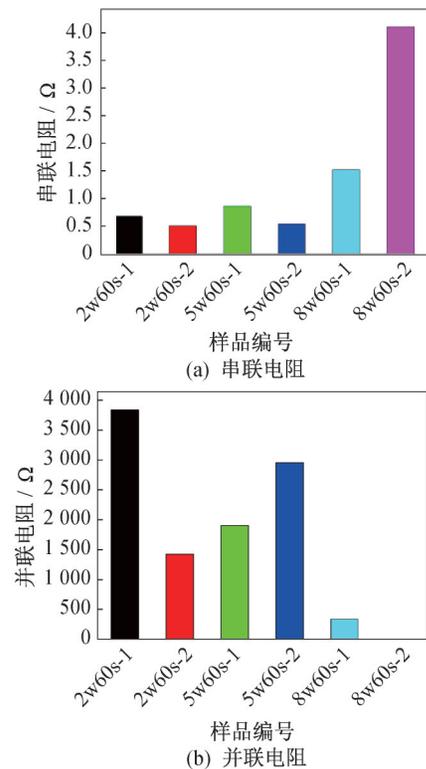


图 8 辐照后电池样品串并联电阻值

Fig.8 Resistance values of the solar cell samples in series and parallel after irradiation

可以看出 2 W/cm^2 电池样品的各子电池量子效率与标准片比较没有明显变化, 5 W/cm^2 电池样品的顶

电池与底电池量子效率发生部分衰减, 8 W/cm^2 电池样品的顶电池与底电池发生严重衰减。

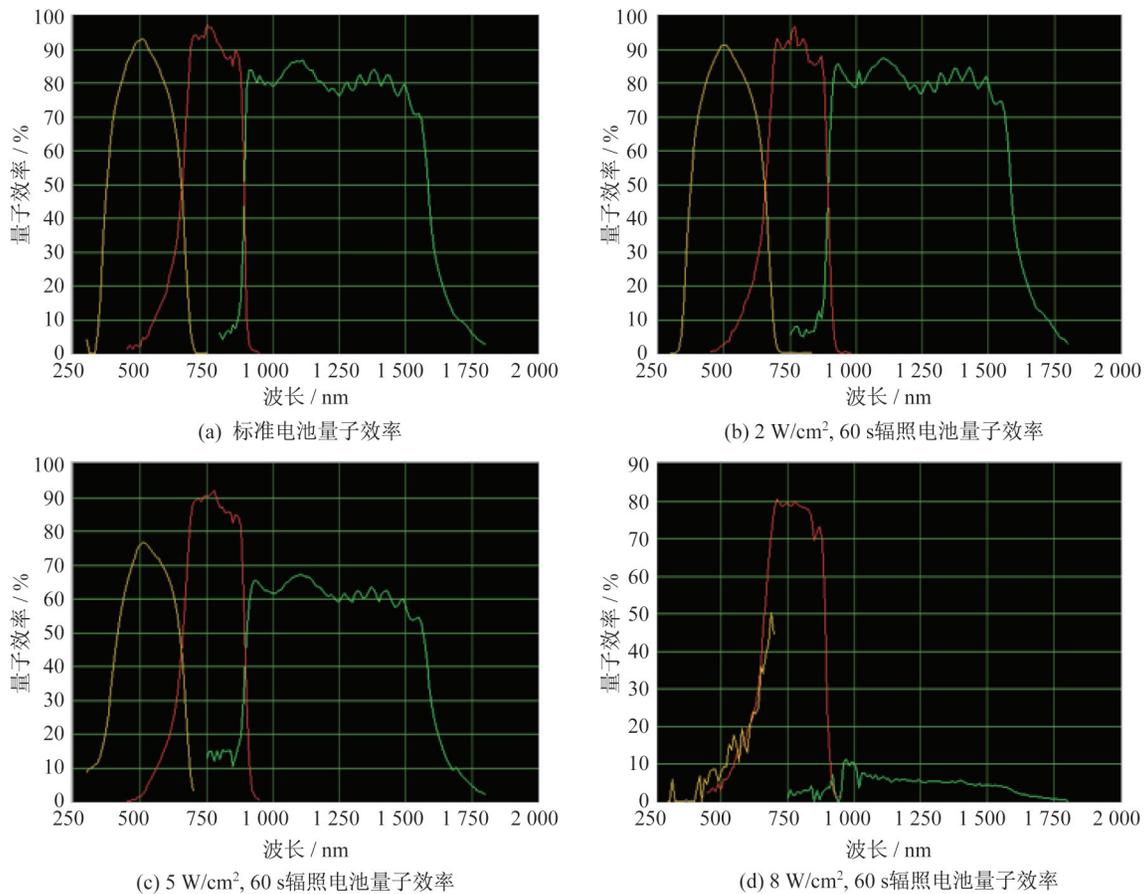


图 9 辐照后电池样品量子效率

Fig.9 QEs of the solar cell samples after irradiation

表 2 辐照后电池样品各子电池光谱响应电流

Tab.2 Spectral response current of sub-cells of the solar cell samples after irradiation $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$

样品	顶电池	中电池	底电池
标准电池	17.57	17.75	28.52
辐照电池 (2 W/cm^2 , 60 s)	17.49	17.73	28.49
辐照电池 (5 W/cm^2 , 60 s)	14.41	17.16	22.47
辐照电池 (8 W/cm^2 , 60 s)	4.21	15.57	2.19

表 3 和图 10 为辐照 (8 W/cm^2 , 60 s) 前后电池背电极 SEM 图及 EDS 元素分析。背电极采用与 P 型 Ge 衬底具有良好欧姆接触的 Pd/Ag/Au 复合金属层, 可以看出辐照前电极层致密连续, 表面 EDS 谱图 Au 元素特征峰显著; 辐照后背电极层发生了明显的形貌变化, 金属层不再致密连续, 呈现相互独立的点状分布, EDS 元素分析表明 Ge 衬底已大面积裸露, 点状区域呈现相关金属元素与 Ge 的合金

态, Pd/Ag/Au 结构已经完全破坏。

表 3 辐照前后背电极表面元素质量分数

Tab.3 Element mass fractions of the back electrode surface before and after irradiation %

元素	辐照前质量分数	辐照后质量分数	
		裸露区域	点状区域
Au	89.79	—	11.16
Ag	5.38	3.90	56.25
Pd	—	—	8.36
Ge	—	91.66	24.22

图 11 所示为辐照 (8 W/cm^2 , 60 s) 前后电池截面 SEM 图, 可以看出与辐照前比较, 盖片胶基本已气化消失, 玻璃盖片与电池裸片层已经完全分离。

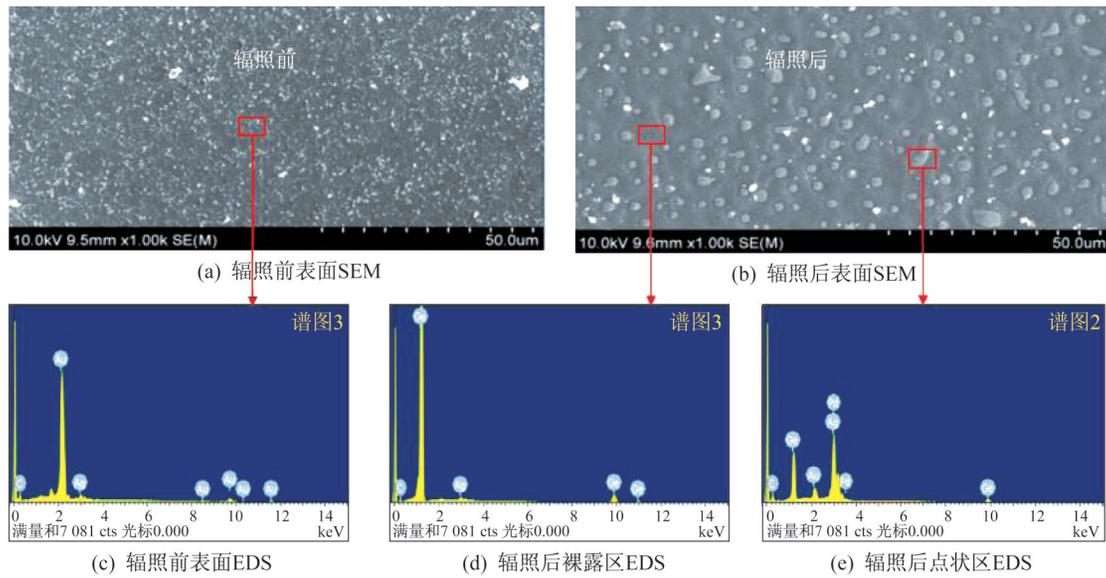


图 10 背电极表面 SEM 及 EDS 辐照前后对比

Fig.10 SEM images and EDS spectra of the back electrode surface before and after irradiation

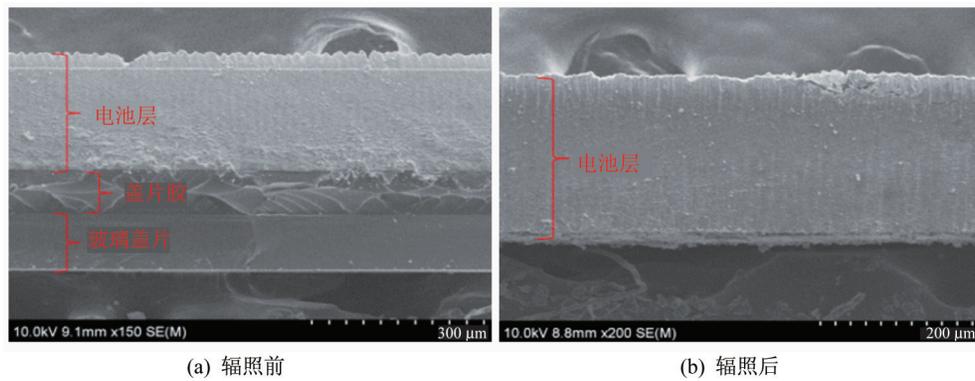


图 11 电池样品截面 SEM 辐照前后对比

Fig.11 SEM images of the solar cell sample section before and after irradiation

3 激光辐照损伤机理分析

由于激光波长为 1 315 nm,光子能量未达到顶电池 GaInP 和中电池 GaAs 的禁带宽度,对两者无光电效应,绝大部分的光子将穿过顶电池和中电池达到底电池。在 Ge 底电池发生光电效应,电子吸收光子从价带跃迁至导带,形成光生载流子,在 PN 结内建电场的作用下,底电池两端光生载流子大量聚集。当产生的漂移电场与内建电场相互平衡时,产生的新光生载流子将完全复合,并与声子相互作用,将激光能量完全转换为热能被底电池吸收。

典型的 GaInP/GaAs/Ge 三结电池由近 20 层材料结构构成,每层材料质量都会影响器件性能。高温将加剧内部掺杂原子的热扩散作用,破坏有序的掺杂结构。由于顶电池采用具有场助收集效应的

$n^+ - n^- / p^- - p^+$ 结构^[10-11],底电池采用减薄型 GaAs-Ge 异质界面扩散结构^[12],使得顶电池与底电池对于热扩散破坏效应更加敏感,高温将破坏内建电场对光生载流子的有效输运,增大界面复合,严重影响顶电池与底电池载流子收集,使电池串联电阻 R_s 增大,并电阻 R_{sh} 减小。此外高温引起背电极金属层的变形,Pd/Ag/Au 结构被破坏,Ge 衬底大面积裸露,将影响电池层与电极层的欧姆接触,进一步增大电池的串联电阻 R_s 。

图 12 为太阳能电池等效电路图,其输出 $I-V$ 特性方程为

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (7)$$

式中: I_{ph} 为光生电流; I_D 为暗电流; I_{sh} 为漏电流。

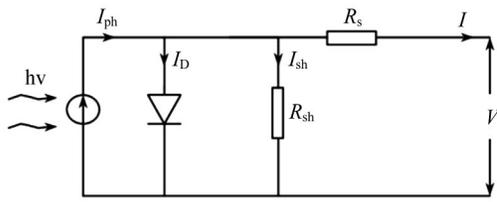
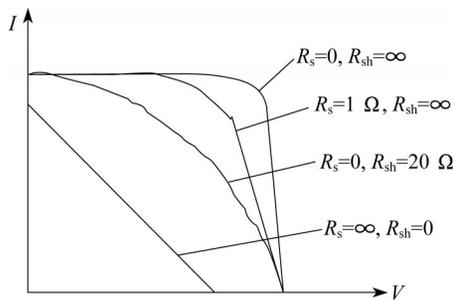


图 12 太阳能电池等效电路图

Fig.12 Equivalent circuit diagram of the solar cell

根据特性方程,串联电阻 R_s 的增大与并联电阻 R_{sh} 的减小都将降低电池的填充因子 FF,而且高的 R_s 值和低的 R_{sh} 值还会分别减小 I_{sc} 和 V_{oc} ,如图 13 所示。

图 13 太阳能电池 I - V 特性曲线Fig.13 I - V characteristic curves of the solar cells

5 W/cm^2 功率密度电池样品会迅速升至 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,引起盖片胶(硅氧烷类材料)中硅氧键的热分解,降低其透光性,主要影响电池的 I_{sc} 。 8 W/cm^2 功率密度将引起盖片胶发生剧烈的裂解反应,产生的小分子硅氧化物使盖片胶发生气化,造成中心区域的体积膨胀。膨胀引起机械应力与温度骤变的热应力会在电池样品内部产生微裂纹,使得电池材料内部产生大量的复合中心与漏电通道,严重降低电池的并联电阻 R_{sh} ,使得电池 V_{oc} 大幅度衰减。

4 结束语

真空环境下采用波长 1315 nm 连续激光辐照三结砷化镓(GaInP/GaAs/Ge)太阳能电池,实验表明: 5 W/cm^2 功率密度辐照 60 s 会造成电池性能的损伤, 8 W/cm^2 功率密度辐照 60 s 会造成电池性能的损坏,效率 E_{ff} 衰减超过 70% 。 $5\sim 8 \text{ W/cm}^2$ 功率密度范围,三结砷化镓电池损伤程度随功率密度增加而增大,但电池样品是否发生损坏与样品本身特性关系密切,即损坏表现出随机性。

损伤机理是热损伤与应力损伤的综合作用:高温将破坏三结砷化镓太阳能电池内部掺杂结构,引起

盖片胶与背电极材料的热分解,主要影响顶电池与底电池对载流子的收集,增大串联电阻 R_s ,减小并联电阻 R_{sh} 。盖片胶热解膨胀引起的机械应力与热应力的综合作用将在电池材料内部产生微裂纹,进一步减小并联电阻 R_{sh} ,引起开路电压 V_{oc} 大幅度降低,最终造成电池的损坏。该结果对三结砷化镓太阳能电池在激光无线能量传输中的应用研究具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] MUKIND R P. Spacecraft power systems [M]. New York: CRC Press, 2005: 1023-1025.
- [2] 张中卫,陆剑峰,池卫英,等.砷化镓太阳能电池技术的进展与前景[J].上海航天,2003,20(3): 33-38.
- [3] 杨业伟,李小将,张东来.基于分离模块航天器的激光输能技术研究[J].激光与红外,2014,44(2): 126-130.
- [4] BECKER D E, CHIANG R, KEYS C C, et al. Photovoltaic concentrator based power beaming for space elevator application [C]// Beamed Energy Propulsion, Proceedings of the 6th International Symposium. 2010: 271-281.
- [5] 邱冬冬,金华松,孙永江,等.1064 nm 激光对太阳能电池的损伤效应研究[J].激光杂志,2013,34(2): 23-24.
- [6] BEECHEM T E, SERRANO J R, MCDONALD A, et al. Assessing thermal damage in silicon PN-junctions using Raman thermometry [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(12): 123106.
- [7] 周广龙,徐建明,陆键,等.连续激光对三结 GaAs 电池的损伤效应[J].中国激光,2017,54: 111412.
- [8] FRIEDMAN D J. Modelling of tandem cell temperature coefficients [C]// The Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996: 89-92.
- [9] 李国欣.航天器电源系统技术概论[M].北京:中国宇航出版社,2008: 530.
- [10] ZHANG Z W, TU J L, WANG L X, et al. 28.28% of GaInP2/InGaAs/Ge triple-junction tandem cells [C]// Proceedings of 31th IEEE PVSEC. 2005: 739-742.
- [11] CHEN M B, CUI R Q, ZHANG Z W, et al. Field-aided collection in GaInP2 top solar cells [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2003, 80(3): 265-272.
- [12] FRIEDMAN D J, OLSON J M. Analysis of Ge junctions for GaInP2/GaAs/Ge three-junction solar cells [J]. Prog Photovolt: Res Appl, 2001, 9(3): 179-189.