

激光诱导三结砷化镓太阳能电池短路电流增大现象与机理

窦鹏程, 冯国斌, 张检民, 林新伟, 李云鹏, 师宇斌, 张震

(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: 为研究三结太阳能电池在强光辐射下的损伤效应规律, 采用 1 070 nm 连续激光作为强辐射光源开展了 n-on-1 模式三结砷化镓(GaAs)太阳能电池激光辐照效应实验。通过分析电池 $I-V$ 曲线发现, 不同于单结太阳能电池短路电流随辐照功率增加呈现出的单调降低, 三结 GaAs 太阳能电池短路电流在辐照功率密度达到 11.1 W/cm^2 时会出现显著增加。文中对短路电流增大的机理进行了推导分析, 得到了短路电流与限流层并联电阻间关系式, 并结合子电池量子效率谱分析认为, 短路电流的增加是由于激光导致的限流层并联电阻减小使得其限流失效所致。基于机理分析的等效电路模型模拟结果与实验数据吻合较好, 从而说明了机理分析的正确性。

关键词: 激光辐照效应; 三结 GaAs 太阳能电池; 短路电流增大; 等效电路模型仿真

中图分类号: TM914; TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.S106009

Mechanism of laser induced short circuit current increasing in triple-junction GaAs solar cell

Dou Pengcheng, Feng Guobin, Zhang Jianmin, Lin Xinwei, Li Yunpeng, Shi Yubin, Zhang Zhen

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: In order to reveal the degeneration mechanism of triple-junction solar cell under intense light radiation, an n-on-1 mode irradiation experiment utilizing a 1 070 nm CW laser as the intense light source was carried out. By summarizing the $I-V$ curves measured after each irradiation, it was found that the short current in triple-junction solar cell will increase when the laser intensity reach to 11.1 W/cm^2 , other than monotonically decrease with laser intensity increasing in single-junction solar cell. Combined with the relationship between short-circuit current and shunt resistance of current limiting sub-cell and QE of sub-cell, a theory was put up to explain the mechanism of this phenomenon, which indicates that it is the reduction of the shunt resistant in current limiting sub-cell failures its current limiting ability, and finally leads to short circuit current increasing. This theory was verified by equivalent circuit calculation with a simulation program with integrated circuit emphasis.

Key words: laser irradiation effect; triple-junction GaAs solar cell; short circuit current increasing; equivalent circuit model simulation

收稿日期: 2017-06-12; 修订日期: 2017-07-15

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1701Z, 71111702)

作者简介: 窦鹏程(1993-), 男, 硕士生, 主要从事激光辐照效应方面的研究。Email: doupengcheng@nint.ac.cn

导师简介: 冯国斌(1972-), 男, 研究员, 博士, 主要从事强激光测量和辐照效应方面的研究。Email: fengguobin@nint.ac.cn

0 引言

自 1954 年美国贝尔实验室首次制成单晶硅太阳能电池以来,光伏产业作为一种新型清洁能源产业发展迅猛。其中,聚光太阳能电池因其高效费比成为了当今的研究热点之一^[1-2]。为了不断降低成本,当前拟投入使用的聚光三结 GaAs 太阳能电池光伏系统的聚光比已超过 1 000^[3]。然而,聚光比的提高在降低成本的同时也为太阳能电池在强光辐射下的耐受力提出了巨大的挑战,因聚光比超过太阳能电池的承受极限时,就会对电池造成损伤。研究高强度光辐射下太阳能电池的损伤机理,能够对聚光太阳能电池的优化设计提供理论指导,对提高聚光太阳能电池的输出功率与延长使用寿命具有重要意义。

当前,对于单结太阳能电池激光辐照效应已有大量实验研究。结果表明,在连续激光辐照下,电池会随着辐照功率的增加出现性能的临时退化、永久降低乃至失效^[4]。针对其损伤机理,分析认为,电池性能的下降低主要是由于串联电阻的增加与并联电阻的减小^[5];在微观层面上,电池性能退化是由于激光加热导致的 PN 结区缺陷的增多^[6];而在脉冲激光作用下,电池的性能退化是热、力共同作用的结果^[7-9],其中热导致性能下降在其它光伏型器件中亦有体现^[10]。对于更高效率的三结太阳能电池,仅对其在高温下的稳定性进行了分析^[11],而对于其激光辐照下的效应机理目前尚无公开报道。三结太阳能电池结构较单结电池复杂,因此其在激光辐照下会出现诸多有待研究的新现象、新机制。

为获取三结太阳能电池激光辐照下的损伤规律,文中采用连续激光作为辐照光源开展实验。依据单次辐照后电池恢复到室温下的 $I-V$ 曲线,给出了三结电池的损伤规律。发现了电池在一定辐照次数后出现短路电流增大现象,此现象区别于单结电池在激光辐照下的短路电流降低^[12]。文中基于短路电流增大这一现象,结合实验测量、理论分析与模拟仿真,阐释了该现象的产生机理。

1 实验及现象

1.1 实验系统及方法

实验装置如图 1 所示。辐照光源为 1 070 nm 连

续激光器。初始光源通过采用两面凸透镜构成的扩束系统实现扩束和准直。分束片配合功率计实现辐照过程中激光功率的实时监测。辐照光源通过 8 mm×9 mm 的限孔光阑辐照到样品表面,同时利用红外测温仪实现辐照过程中电池中心温度的监测。样品采用乾照光电有限公司生产的 10 mm×11 mm 三结 GaAs 太阳能电池,其是通过隧穿结将 GaInP 顶电池、GaAs 中电池和 Ge 底电池串联而成,具体结构由图 2 给出。

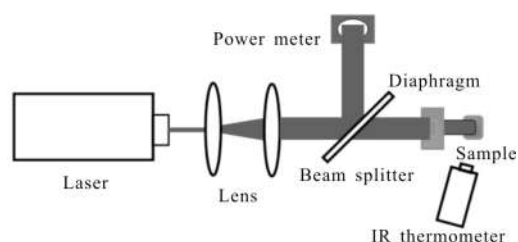


图 1 辐照实验光路图

Fig.1 Schematic of laser irradiating facility

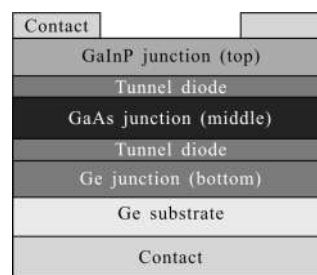


图 2 三结 GaAs 太阳能电池结构示意图

Fig.2 Schematic of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell

在电池 $I-V$ 曲线测量中,利用氙灯配合滤光片实现 AM0 条件下的太阳光谱辐照,采用数字源表实现电池两端电压的扫描与电流的测量。

实验中,采用 n-on-1 模式对电池进行辐照,单次辐照时间为 60 s。为确保每次辐照前后电池的输出性能出现明显下降,采用的辐照功率强度逐次增加,具体数值由表 1 给出。

表 1 实验中采用的辐照功率密度

Tab.1 Irradiation power intensity used in experiment

Irradiation times	1	2	3	4	5	6	7
Irradiation power intensity /W·cm ⁻²	7.2	8.2	9.0	9.7	10.4	11.1	11.9

1.2 实验现象及规律

实验发现,在前 5 次辐照中,电池的短路电流基

本维持在 5 mA 左右,其开路电压与填充因子呈现出单调递减。待到第 6 次辐照后,电池短路电流增加到 7.2 mA,并在第 7 次辐照后持续增加至 9.2 mA。观察 5、6、7 次辐照后电池 $I-V$ 曲线的形状发现,在第 6 次辐照后,电池的 $I-V$ 曲线发生了明显畸变,而在第 7 次辐照后又恢复正常,在参数上表现为填充因子反转(即由小变大)。除此之外,电池的开路电压也在短路电流上升期间出现加速下降。实验过程中电池的 $I-V$ 曲线如图 3 所示,对应开路电压、短路电流、填充因子随辐照次数的变化见图 4。

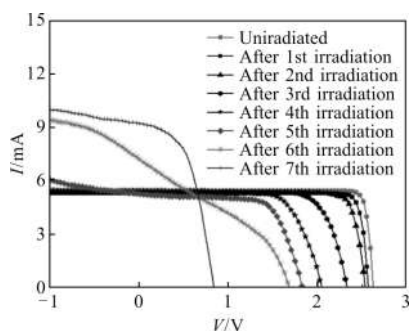


图 3 辐照过程 $I-V$ 曲线

Fig.3 $I-V$ curves measured after each sequential irradiation

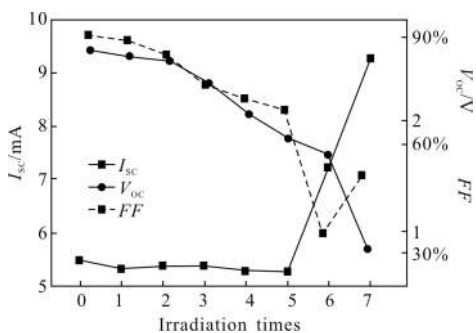


图 4 I_{sc} 、 V_{oc} 、 FF 随辐照次数变化曲线

Fig.4 I_{sc} 、 V_{oc} and FF vs irradiation times

2 机理与仿真

2.1 机理分析

为明确当短路电流增加时各子电池的损伤情况,对其量子效率进行了测量,结果如图 5 所示。

可以看出,此时顶电池量子效率谱已基本为 0,中、底电池未出现明显退化。因此可以初步判断,短路电流的增加主要是由顶电池性能退化所引起。进一步观察图 4 可知,短路电流增大的过程同时伴随着填充因子反转与开路电压的加速下降。对于单结

电池而言,影响填充因子的主要因素为串并联电阻,较小的并联电阻又会导致开路电压的降低^[3]。基于以上现象与分析推测,三结电池短路电流的增加由顶电池并联电阻降低所引起。具体分析如下。

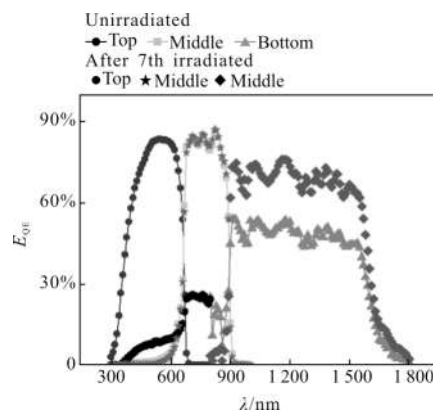


图 5 第 7 次辐照后电池量子效率谱

Fig.5 QE of solar cell after 7th irradiation

首先考虑测量短路电流时各子结偏压情况。三结太阳能电池因其串联结构,总输出电压与各子电池电流电压有如下关系式,其中 i 为子电池下标。

$$V_{out} = \sum_{i=1}^3 V_i \quad (1)$$

$$I_{out} = \min \{ I_i \} \quad (2)$$

现考虑理想双结电池等效电路模型如图 6 所示。

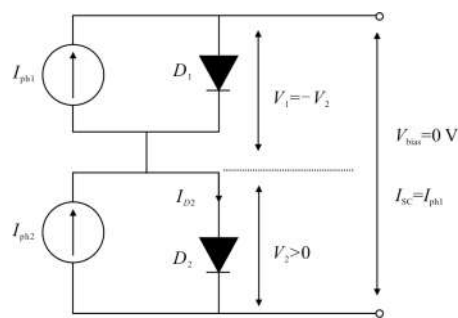


图 6 限流层反偏原理图

Fig.6 Reverse bias on current-limiting sub-cell

设有关系式 $I_{ph2} - I_{ph1} > 0$,在测量短路电流时,电池整体的偏置电压为 0 V。由公式(1)可得 $I_{sc} = I_{ph1}$ 。针对子电池 2,由基尔霍夫定律有 $I_{ph2} - I_{ph1} = I_{D2}$ 。依据二极管电流电压关系易知,此时在二极管 D_2 两端会产生正向压降,设其大小为 V_2 ,由电压关系式(2)有 $V_1 = -V_2 < 0$,即此时在顶电池两端产生反向偏压。因此,对于多结电池而言,当外加 0 偏压测其短路电流时,总是会在

限流层加反向偏压。

对考虑并联电阻影响的三结太阳电池而言,等效电路见图 7,由上到下分别代表 GaInP 层、GaAs 层 and Ge 层。各子电池并联电阻在电池外加偏压不为零时,就会产生电流,从而影响子电池输出电流大小。

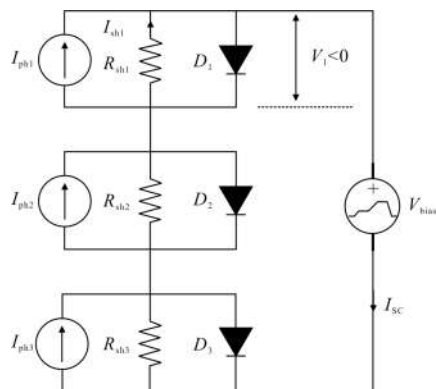


图 7 三结太阳电池等效电路图

Fig.7 Equivalent circuit of triple-junction solar cell

对于三结太阳电池,通常有 $I_{GaInP} < I_{GaAs} < I_{Ge}$, 即 $\min\{I_{ph,i}\} = I_{ph1}$ 。在外加 0 偏压时,对应 $V_1 < 0$, 从而有如下关系式:

$$I_{sh1} = \frac{V_1}{R_{sh1}} \quad (3)$$

$$I_{sc} = I_{ph1} + I_{sh1} \leq \min(I_{ph,i}) \quad (4)$$

易知,当 R_{sh1} 较大,有 $I_{sh1}/I_{ph1} \rightarrow 0$, 此时 $I_{sc} \approx I_{ph1}$; 当 R_{sh1} 降低到一定大小,使得 $I_{sh1}/I_{ph1} \sim 1$ 时, I_{sc} 会出现可观增加; 当 R_{sh1} 继续降低,对应的 I_{sc} 会不断增加,直至被限流层所限制。这一过程可概括为顶电池的限流失效。

由以上分析可知,初始情况下顶电池并联电阻的减小致使的顶电池限流失效是导致三结 GaAs 太阳电池短路电流增大的主要原因。

2.2 数值仿真

等效电路模型是研究太阳电池输出特性的常用手法,其中最常采用的模型为五参数模型,在此基础上,为进一步接近实际,又发展出三^[14]二极管模型、多单元模型^[15]、三维等效模型等^[16]。五参数模型作为最基本、最简单的模型,其各部分元件对电池性能的影响已有较全面的研究^[17],且各元件参数可从电池实际 $I-V$ 曲线中进行提取^[18]。因此,文中基于单结电池的五参数模型,结合实际需求,忽略串联电阻的影响,采用四参数模型对应的三结电池等效电路模型

进行模拟仿真。

仿真中采用图 7 所示的等效电路图。时变电源 V 的扫描电压范围为 $-1 \sim 3$ V, 其他元件初始参数由表 2 给出,其中 n_0 、 I_s 分别为等效二极管理想因子与反向饱和电流。

表 2 等效电路模型元件初始参数值

Tab.2 Original parameters of the equivalent circuit

Parameter	n_0	I_{ph}/mA	I_s/A	$R_{sh}/\text{k}\Omega$
GaInP top cell	2	5	20×10^{-15}	100
GaAs middle	2	10	45×10^{-12}	100
Ge bottom cell	2	15	130×10^{-6}	100

由于三结太阳电池开路电压为各子电池开路电压的线性叠加,因此总的开路电压的降低亦为子电池开路电压降低的线性叠加。一般认为,少数寿命的缩短导致反向饱和电流增大是致使开路电压降低的主要因素^[13]。

针对实验中短路电流的增加过程,仿真中,通过增大顶、中电池反向饱和电流 I_s 来实现开路电压的减小,减小顶电池并联电阻来实现短路电流的增加,利用 LTspice 软件模拟结果见图 8。

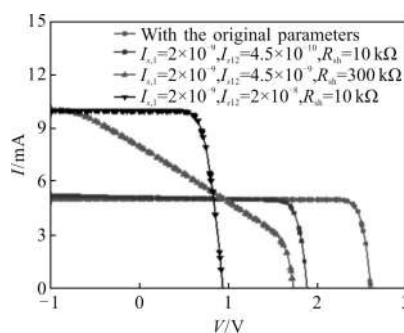


图 8 $I-V$ 曲线模拟结果

Fig.8 Simulation results of $I-V$ characteristics

2.3 对比总结

对比图 8 与图 3 可得,仿真结果与实验数据吻合较好,从而较好地说明了机理分析的正确性,即激光致使顶电池并联电阻减小是导致三结 GaAs 太阳电池短路电流上升的主要因素。为进一步探索并联电阻减小的原因,测量所得辐照功率 11.9 W/cm^2 时电池中心的温度历程如图 9 所示。

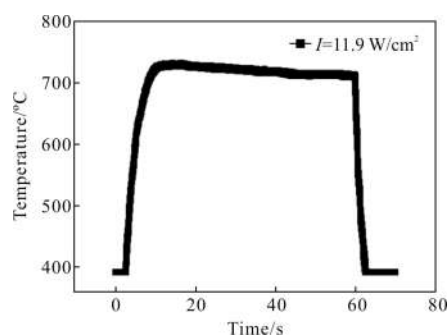


图 9 电池辐照过程温度历程

Fig.9 Temperature history of solar cell in irradiation

可知此时电池经历过的最高温度已超过 730 °C。而高温下结区杂质的扩散^[9]、导电旁路的形成^[5]等会导致 PN 结整流特性降低，体现在等效电路上则为并联电阻的降低。

3 结论

文中利用 1 070 nm 激光以 n-on-1 辐照模式,对三结 GaAs 太阳电池在激光辐照下的损伤规律开展研究。发现了三结电池随着损伤加剧出现短路电流增大的现象,其与限流层(GaInP 层)性能状态密切相关。即当限流层并联电阻在激光辐照作用下退化到一定大小时,短路电流测量时施加在限流层两端的反向偏压就会在并联电阻上产生大小可观的正向电流,该电流与光生电流叠加使得限流层输出电流显著增加,最终导致电池总输出短路电流增大。基于机理分析的等效电路模拟结果与实验结果的基本吻合说明了此分析的正确性。文中发现的三结 GaAs 电池短路电流增大现象可为聚光电池后端电子设备的防护提供参考,分析得到的短路电流增大机理又可作为改进三结 GaAs 太阳电池制造工艺的重要依据。

参考文献:

[1] Ochoa M, Barrigón E, Barrutia L, et al. Limiting factors on the semiconductor structure of III-V multijunction solar cells for ultrahigh concentration(1 000-5 000 suns)[J]. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2016, 24: 1332-1345.

[2] Xing Yupeng, Han Peide, Wang Shuai, et al. A review of concentrator silicon solar cells [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 51: 1697-1708.

[3] Ghosal K, Lilly D, Gabriel J, et al. Semprius field results

and progress in system development [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(2): 703-708.

[4] Qiu Dongdong, Wang Rui, Cheng Xiang' ai, et al. The irradiation effect of single silicon solar cell under CW CO₂ laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6): 1671-1674. (in Chinese)

邱冬冬, 王睿, 程湘爱, 等. CO₂ 连续激光对单晶硅电池的辐照效应[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(6): 1671-1674.

[5] Qiu Dongdong, Wang Rui, Cheng Xiang' ai, et al. Mechanisms research on continuous wave laser induced damage to solar cells [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(3): 0302006. (in Chinese)

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.

[6] Li Yunpeng, Feng Guobin, Zhang Jianmin. Experimental verification of thermal damage mechanism in single junction GaAs solar cells irradiated by laser[Z]. 2017: 10173.

[7] Zhu Rongzhen, Wang Rui, Jiang Tian, et al. Research of laser irradiation effect on monocrystalline silicon solar cells and single junction GaAs solar cells [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(4): 479-485. (in Chinese)

朱荣臻, 王睿, 江天, 等. 单晶 Si、单结 GaAs 太阳能电池的激光损伤特性对比研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(4): 479-485.

[8] Matsuoka Yoshiharu, Usami Akira. Laser damage to copper-doped and undoped silicon solar cells[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1974, 7(7): 1259-1269.

[9] Tian Xiuqin, Xiao Si, Tao Shaohua, et al. Damage threshold research of mnoncrystalline silicon solar cells under femtosecond laser illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 676-680. (in Chinese)

田秀芹, 肖思, 陶少华, 等. 飞秒超短脉冲激光对硅太阳能电池的损伤阈值研究 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 676-680.

[10] Xu Zuodong, Zhang Jianmin, Lin Xinwei, et al. Abnormal behavior of photovoltaic HgCdTe detectors under intense pulse laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 50-56. (in Chinese)

徐作冬, 张检民, 林新伟, 等. 强脉冲激光作用下碲镉汞光伏探测器的反常行为[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 50-56.

[11] Ren Pan, Wu Lingyuan, Wang Weiping, et al. Change of electroluminescence spectra of solar cells caused by heating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 121602. (in Chinese)

任攀, 吴凌远, 王伟平, 等. 高温导致三结太阳能电池电致发

- 光谱变化[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 121602.
- [12] Qiu Dongdong, Jin Huasong, Sun Yongjiang. Damage effects research of solar cell under the irradiation of 1 064 CW laser [J]. *Laser Journal*, 2013, 34(2): 23–24. (in Chinese)
邱冬冬, 金华松, 孙永江. 1 064 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.
- [13] Zhu Meifang, Xiong Shaozhen. Principal and Application of Solar Cell[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
朱美芳, 熊绍珍. 太阳能电池基础与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [14] Nishioka Kensuke, Sakitani Nobuhiro, Uraoka Yuki-haru, et al. Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3 -diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consid-eration [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, 91(13): 1222–1227.
- [15] Nishioka Kensuke, Takamoto Tatsuya, Agu Takaaki, et al. Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell under concentrated light by simulation program with integrated circuit emphasis [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(3): 882–889.
- [16] Ota Yasuyuki, Nishioka Kensuke. Three-dimensional simulating of concentrator photovoltaic modules using ray trace and equivalent circuit simulators [J]. *Solar Energy*, 2012, 86(1): 476–481.
- [17] Zhang Zhongzheng. Theoretical study of solar cells utilization [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
张忠政. 太阳能电池应用理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [18] Shi Yubin, Zhang Jianmin, Zhang Zhen, et al. Analysis of laser-induced damage mechanism in Si photodiode based on parameter extraction of equivalent circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12). (in Chinese)
师宇斌, 张检民, 张震, 等. 基于等效电路参数提取的硅光电二极管激光损伤机理分析 [J]. 红外与激光工程. 2017, 46(12).
- [19] Beechem Thomas E, Serrano Justin R, Mcdonald Anthony, et al. Assessing thermal damage in silicon PN-junctions using Raman thermometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(12): 123106.