

连续激光对太阳能电池的损伤机理研究

邱冬冬^{1,2} 王睿¹ 程湘爱¹ 张震¹ 江天¹

(¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)
(²中国卫星海上测控部远望二号测量船, 江苏江阴 214431)

摘要 针对连续激光辐照太阳能电池造成的损伤效应,通过观察电池损伤区域的形貌,结合电池的等效电路和 $I-V$ 特性曲线,分析了已损伤电池的输出参数下降情况以及激光辐照所带来的影响,并对太阳能电池的损伤机理进行了研究。研究表明,激光烧蚀太阳能电池导致烧蚀区域无功功率输出,同时使得电池的串联电阻增加,并联电阻减小,导致电池输出性能大幅度下降。

关键词 连续激光;太阳能电池;损伤机理;烧蚀;串联电阻;并联电阻

中图分类号 TN249;TM914.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0302006

Mechanisms Research on Continous Wave Laser Induced Damage to Solar Cells

Qiu Dongdong^{1,2} Wang Rui¹ Cheng Xiang'ai¹ Zhang Zhen¹ Jiang Tian¹

¹ College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

² Yuanwang 2, Chinese Satellite Maritime Tracking and Controlling Department, Jiangyin, Jiangsu 214431, China

Abstract Aiming at the damage effects of solar cells under the irradiation of continous wave laser, the output parameter decrease of damaged solar cells and impact induced by laser irradiation are analyzed, the damage mechanisms of solar cells are researched through the observation of morphology of damaged area combined with the equivalent circuit diagram and $I-V$ curves. The results show that laser ablated solar cell resulted in the ablation area is disabled, causes the increase of series resistance and the decrease of parallel resistance at the same time, and finally induces the output performance of solar cell to decrease largely.

Key words continous wave laser; solar cells; damage mechanisms; ablation; series resistance; parallel resistance

OCIS codes 140.3470; 140.3330; 350.6050

1 引 言

太阳能电池作为各种类型航天器的电源,运行于地球的大气层之外,这些区域有密度较高的能量介于千电子伏到几百兆电子伏的高能粒子,太阳能电池被其中的高能电子和高能质子辐照之后,输出性能会发生严重下降。针对这种现象,国外从 20 世纪 60 年代起就开展了一系列高能粒子辐照太阳能电池的实验研究^[1~3],国内从 20 世纪 90 年代以来也进行了一些相关研究^[4~10]。公开报道的关于太

阳能电池激光辐照效应的研究不多,主要是使用脉冲激光作为电池阵的能量源的研究^[11,12]。本文针对 CO₂ 连续激光辐照单晶硅太阳能电池造成的损伤,通过对损伤形貌的观察和对损伤结果的分析,结合对电池特性的分析,研究了太阳能电池的损伤机理。

2 损伤结果及机理分析

实验采用 CO₂ 激光,波长为 10.6 μm ,光斑直径为 3 mm,以面积为 2 cm \times 2 cm 的单晶硅太阳能

收稿日期: 2010-09-13; 收到修改稿日期: 2010-10-22

作者简介: 邱东东(1985—),男,硕士研究生,助理工程师,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: qido00@163.com

导师简介: 程湘爱(1966—),女,博士,教授,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: xiang_ai_cheng@126.com

电池为辐照实验对象。单晶硅太阳能电池的结构如图 1 所示。表面玻璃盖片的作用是阻挡高能粒子和紫外线,保护单晶硅太阳能电池;电池顶部的抗反射涂层,能将光反射损失降低到 5% 以下;前表面的栅状电极和后表面的背电极是为了减少光生载流子在硅电池体内运动时的损耗。

2.1 损伤结果

在室温条件下,当激光的功率密度为 $4.4 \times 10^2 \text{ W/cm}^2$ 时,辐照裸露的单晶硅太阳能电池 50 s, 电池表面被烧蚀的形貌如图 2(a) 所示,PN 结层形成了被严重烧蚀的熔坑,熔坑的直径为 5 mm。热应力导致光斑周围区域的玻璃盖片与抗反射涂层之间出现空隙,并且空隙边缘有圆形的裂纹。图 2(b)

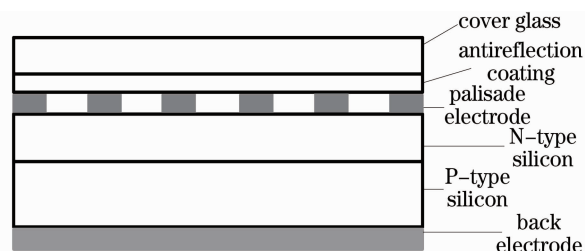


图 1 单晶硅太阳能电池的截面构造
Fig. 1 Cross section of a monocrystalline silicon solar cell

是辐照前后电池 $I-V$ 特性曲线的对比情况,可以看出,辐照后,电池的 $I-V$ 特性曲线大幅收缩,已经接近成为直线。辐照前后电池的输出参数对比如表 1 所示。

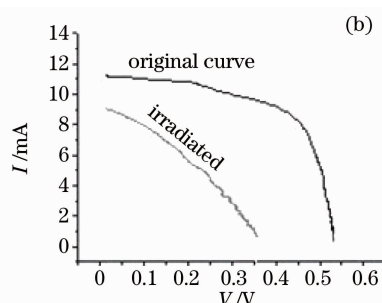
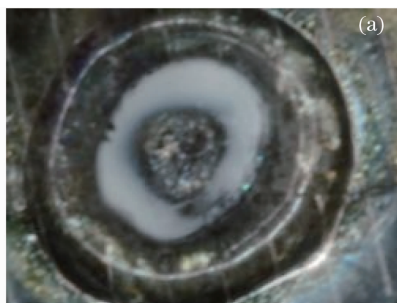


图 2 (a)被激光辐照后太阳能电池的表面形貌,(b)激光辐照前后 $I-V$ 特性曲线

Fig. 2 (a) Morphology of solar cell being irradiated by laser, (b) $I-V$ curves of solar cell before and after irradiation by laser

表 1 辐照前后太阳能电池的输出性能参数对比
Table 1 Comparison between output performance parameters of solar cell before and after irradiation

	P_m	I_{sc}	V_{oc}
Before irradiation	4.06 mW	12.07 mA	528.3 mV
After irradiation	1.37 mW	10.92 mA	358.4 mV
Reduction ratio /%	66.3	9.5	32.2

太阳能电池是并联式结构,在保持电池通路的前提下,损伤区域并不影响其他区域的输出性能,因为损伤区域并不影响正常区域光生载流子的生成及电极对载流子的捕获。在保持外部条件的前提下,太阳能电池的短路电流和最大输出功率,大致上跟电池的面积成正比例,而开路电压不随面积的变化而变化^[13]。在实验中,电池被激光烧蚀的熔坑面积只占电池面积的 4.9%,但是从表 1 中的数据可以看出,电池的短路电流 I_{sc} ,开路电压 V_{oc} 和最大输出功率 P_m 都发生了大于此值的不同程度的下降。

2.2 机理分析

太阳能电池是把 PN 结区产生的少数载流子所引起的电流通过电极传输给外部负载的,自产生之后,少数载流子从 PN 结区运动到负载要经过半

导体层、金属电极、外部导线以及负载的接触端,这些部分本身的电阻以及它们之间在接触处产生的电阻构成了从 PN 结区到负载之间的内部串联电阻。此外,在 PN 结处有缺陷时,太阳能电池在结区将产生正常情况电流之外的漏电流,这相当于在电池内部并联了一个电阻,即为内部并联电阻。此外,PN 结处的线性、非线性边缘导电旁路、微小划痕等,也可以引入并联电阻^[14]。理想状态下电池的串联电阻为零,并联电阻为无穷大。

激光辐照区域太阳能电池被烧蚀成熔坑,熔坑处 PN 结被完全破坏,丧失了产生光生载流子的能力。熔坑周围的小部分区域,玻璃盖片与抗反射涂层之间出现空隙,造成了到达这部分区域的光减少,光生载流子也随之减少,不过这一区域性能下降十分有限,相对可以忽略。熔坑处及周围的栅状电极产生不同程度的损伤,同时掺杂硅电池体内缺陷增加,使得光生电子从 PN 结区收集到 N 极的过程中损耗增加,电池的串联内阻随之增加。激光烧蚀破坏 PN 结,辐照过程中带来的大幅度温升,造成了 PN 结区缺陷的大量增加,这些缺陷作为强烈的复

合中心产生了复合电流；同时，烧蚀的熔坑边缘处PN结的杂质和导电旁路也会造成漏电流的产生。这些反向电流的增加导致光生电流的减小，造成了太阳能电池并联电阻的降低。

根据以上分析，可以得到如图3所示的太阳能电池的等效电路，其中 I_{ph} 是光生电流， I_d 是在光生电压作用下PN结的正向电流， I_{sh} 是因并联电阻而产生的漏电流， I_L 为流经外部负载的电流； V 是PN结两旁的正向电压， V_L 是负载两旁的电压； R_s 是电池内部串联电阻， R_{sh} 是电池内部并联电阻。

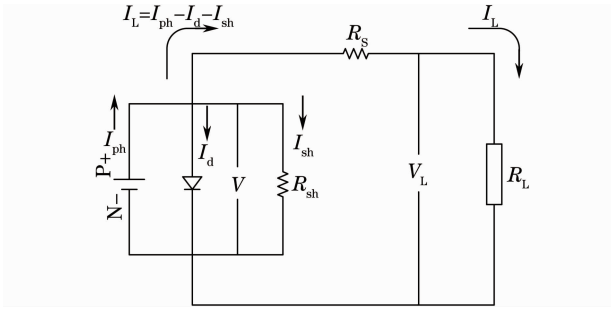


图3 太阳能电池等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit schematic of a solar cell

根据PN结整流方程，在正向偏压 V 的作用下，通过结的电流为

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

式中 I_s 是反向饱和电流， q 为电子电量。 V 不能直接测出来，但是根据等效电路，可以得到电压关系式为

$$V = V_L + I_L R_s. \quad (2)$$

漏电流 I_{sh} 可表示为

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}}. \quad (3)$$

在太阳能电池与外接负载保持为通路的情况下，电路中存在的电流关系式为

$$I_L = I_{ph} - I_d - I_{sh}. \quad (4)$$

将(1)~(3)式代入可得

$$I_L = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(q \frac{V_L + I_L R_s}{k_0 T}\right) - 1 \right] - \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}}, \quad (5)$$

式中 V_L 和 I_L 之间的关系就是太阳能电池的伏安特性，去掉有关 R_s 和 R_{sh} 的项即为理想状态下的伏安特性。在PN结开路的情况下($R_L = \infty$)，流经 R_L 的电流 $I_L = 0$ 。此时，负载两端的电压即为开路电

压 V_{oc} 。将 $I_L = 0$ 代入(5)式可得

$$I_{ph} = I_s \left[\exp\left(q \frac{V_L}{k_0 T}\right) - 1 \right] + \frac{V_L}{R_{sh}}. \quad (6)$$

当PN结短路时($R_L = 0$)， $V_L = 0$ ，此时的电流为短路电流 I_{sc} 。将 $V_L = 0$ 代入(5)式可得

$$I_L = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(q \frac{I_L R_s}{k_0 T}\right) - 1 \right] - \frac{I_L R_s}{R_{sh}}. \quad (7)$$

(6)式中 V_L 和(7)式中 I_L 的解即是开路电压和短路电流，两式均为超越方程，没有解析解，并且无法测量 R_s 和 R_{sh} 的值。但是可以把太阳能电池的等效电路和 $I-V$ 特性曲线结合起来，考虑电池的内部串联电阻和并联电阻对太阳能电池的各性能参数以及 $I-V$ 特性曲线的影响。

对照图4(a)分析一下串联电阻对太阳能电池输出特性参数的影响。理想状态下负载为 R_s 时的电流值即相当于考虑串联内阻 R_s 的情况下负载为0时的电流值，也就是考虑 R_s 时的短路电流。按照这个推算方法，与理想的 $I-V$ 曲线上阻值为 $R_1 + R_s$ 的B点的电流值相同但是电阻值比B点小 R_s 的点B'点就是考虑串联内阻时 $I-V$ 曲线上电阻为 R_1 的点。以此类推，把理想 $I-V$ 曲线上的点，扣除掉串联内阻 R_s 引起的电压降部分，就得到了图4(a)中的用虚线表示的曲线。从另一个角度讲，考虑串联内阻时的 $I-V$ 特性曲线也就是理想 $I-V$ 特性曲线与直线 $V = -I \times R_s$ 在电压方向的合成。新的曲线中， I_{sc} 降低，最大输出功率随之下降。

对于并联内阻对太阳能电池输出特性的影响，参照图4(b)。由(4)式，理想状态下的 $I-V$ 特性曲线即是由光生电流 I_{ph} 减去PN结电流，而忽略内部并联电阻带来的漏电流。在图像上的表现就是，以 $I = I_{ph}$ 作为基准线，减掉PN结电流曲线。按照这个思路，把理想状态下的 $I-V$ 特性曲线减掉并联内阻引入的电流 $I_{sh} = V/R_{sh}$ 即得到图4(b)所示的虚线，也就是考虑并联电阻 R_{sh} 时的 $I-V$ 特性曲线。与理想曲线相比， V_{oc} 降低，最大输出功率也随着减小。

激光烧蚀损伤太阳能电池，烧蚀区域的电池完全丧失输出能力，同时造成了电池的串联电阻增加，并联电阻减小。串联电阻增加的结果是电池的短路电流减小，并联电阻减小的结果是电池的开路电压减小，几种因素的共同作用，使得太阳能电池的 $I-V$ 特性曲线大幅度地向内收缩，最大输出功率随之大幅度降低，降低的比例远大于烧蚀面积所占的比例。

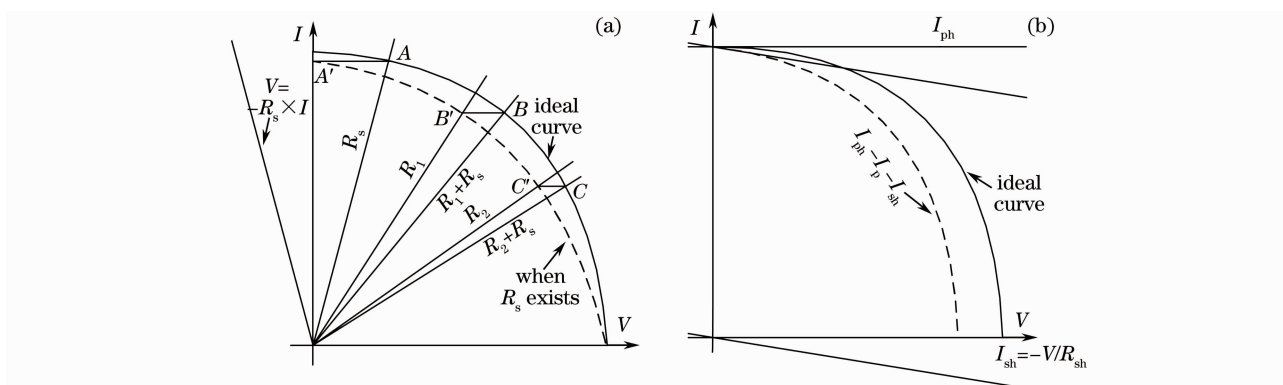


图 4 串联电阻(a)和并联电阻(b)对 $I-V$ 特性曲线的影响

Fig. 4 Effect of series resistance (a) and parallel resistance (b) on $I-V$ curves

3 结 论

通过观察太阳能电池的损伤形貌,分析损伤后电池自身参数变化及其对输出特性参数和 $I-V$ 特性曲线影响的方法,研究了激光对太阳能电池的损伤机理。研究发现,太阳能电池损伤的原因可以归结为:激光烧蚀区域的电池完全丧失输出能力;激光损伤电池以及辐照过程中带来的温升,使得电池的串联电阻增加,并联电阻减小,致使 I_{sc} 和 V_{oc} 降低,太阳能电池 $I-V$ 特性曲线大幅向内收缩,导致电池的最大输出功率发生大幅度下降,且下降比例远超损伤面积占整个电池面积的比例。

参 考 文 献

- 1 D. J. Curtin, A. Meulenbergh. Statistical analysis of one MeV electron irradiation of silicon solar cells[C]. Proc. Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 1970. 193~200
- 2 R. L. Crabb. Photon induced degradation of electron and proton irradiated silicon solar cells [C]. Tenth IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 1974. 404~411
- 3 D. J. Curtin, R. L. Statler. Review of radiation damage to silicon solar cell [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1975, **11**(4): 499~513
- 4 Ai Erken, Guo Qi, Ren Diyu et al.. Radiation characteristics of thin and textured thin Si solar cells irradiated by 1-MeV electrons[J]. *Nuclear Techniques*, 2004, **27**(4): 277~280
艾尔肯, 郭旗, 任迪远等. 超薄和超薄绒面 Si 太阳能电池的 1-MeV 电子辐照特征[J]. *核技术*, 2004, **27**(4): 277~280
- 5 Xia Gengpei, Zheng Jiagui, Feng Lianghuan et al.. Study of the preparation of CdTe solar energy cell and the effect of electron irradiation on it [J]. *J. Sichuan University(Natural Science Edition)*, 2004, **41**(1): 118~121
夏庚培, 郑家贵, 冯良桓等. CdTe 太阳能电池的制备及电子辐照对电池影响的研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2004, **41**(1): 118~121

- 6 Sun Xufang, Wang Rong, Liu Yunhong et al.. A comparison of electric property changes of GaAs/Ge space solar cell irradiated by proton and electron [J]. *J. Beijing Normal University (Natural Science)*, 2006, **42**(5): 489~491
孙旭芳, 王荣, 刘运宏等. 质子辐照与电子辐照对空间 GaAs/Ge 太阳能电池性能影响比较[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2006, **42**(5): 489~491
- 7 Zhao Huijie, He Shiyu, Xiao Zhibin et al.. 50~170keV proton irradiation on spectral response in GaAs/Ge space solar cell[J]. *Nuclear Techniques*, 2008, **31**(1): 31~34
赵慧杰, 何世禹, 肖志彬等. 50~170 keV 质子照射对 GaAs/Ge 太阳能电池光谱响应的影响[J]. *核技术*, 2008, **31**(1): 31~34
- 8 Yu Rongjin. Optics and solar energy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1751~1755
于荣金. 光学与太阳能 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1751~1755
- 9 Qiu Mingbo, Huang Yinhui, Liu Zhidong et al.. Numerical study on effect of silicon texture structure on reflectance of light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2394~2399
邱明波, 黄因慧, 刘志东等. 硅片绒面形貌影响光线反射的数值研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2394~2399
- 10 Fang Zujie, Chen Gaoting, Ye Qing et al.. Progress of photovoltaic electric power generation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 5~14
方祖捷, 陈高庭, 叶青等. 太阳能发电技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 5~14
- 11 J. A. Yater, R. A. Lowe, P. P. Jenkins et al.. Pulse laser illumination of photovoltaic cells [C]. First WEPEC, Hawaii: 1994, (5-9): 2177~2180
- 12 R. K. Jain. Calculated performance of indium phosphide solar cells under monochromatic illumination [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1993, **40**(10): 1893~1895
- 13 Chimdindu U. Nebo. Understanding $\mu\text{-Si}:\text{H}$ Solar Cell Performance and its Optimization Using Modeling [D]. Delft: Delft University of Technology, 2009. 13~14
- 14 O. Breitenstein, J. P. Rakotoniaina, M. H. Al Rifai et al.. Shunt types in crystalline silicon solar cells [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2004, **12**(7): 529~538