

超短脉冲激光对单晶硅太阳能电池的损伤效应

邱冬冬^{1,2}, 王睿², 程湘爱², 张震², 江天²

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

摘要: 太阳能是未来的主要能源之一, 关于太阳能电池的研究也逐渐成为热点。长期以来, 人们对太阳能电池的高能粒子辐射特性进行了广泛的研究, 对其激光辐照损伤特性的研究却很少。随着光电对抗技术的发展, 对这方面的研究需求也越来越迫切。研究了 532 nm、20 ns 和 300 ps 脉冲激光对单晶硅太阳能电池的辐照效应, 分析了超短脉冲激光对单晶硅太阳能电池的损伤机理。对比了超短脉冲激光和长脉冲激光、连续激光的损伤机理的异同。阐述了在激光单脉冲能量一定的情况下, 损伤效果与脉宽和重频的关系。通过分析, 指出了太阳能电池损伤的主因, 激光对太阳能电池的破坏主要是依靠热效应。

关键词: 超短脉冲激光; 单晶硅太阳能电池; 损伤效应

中图分类号: TN249 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0112-04

Damage effect of monocrystalline silicon solar cells under ultrashort pulse laser irradiations

Qiu Dongdong^{1,2}, Wang Rui², Cheng Xiang'ai², Zhang Zhen², Jiang Tian²

- (1. Yuanwang 2, China Satellite Maritime Tracking and Controlling Department, Jiangyin 214431, China;
2. College of Photon-electron Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Solar energy is one of the leading energy in the future, and researches about solar cells are becoming hot spots gradually. Its properties under energetic particles irradiations have been widely characterized, but there is few about its laser-induced damage. So it's necessary to study the laser-induced damage of solar cells. Behaviors of monocrystalline silicon solar cells under 532 nm 20 ns and 300 ps pulse laser irradiations were studied. Damage mechanism of monocrystalline silicon solar cells under the irradiations of ultrashort pulse laser was analyzed. When the single pulse energy was fixed, the relation among damage effect, pulse width and repetition frequency was described. The differences of damage mechanism between different types of laser were compared. Through the analysis, the principal factor of solar cells' damage was pointed out, and the damage of solar cells induced by laser irradiation mainly relied on the thermal effect.

Key words: ultrashort pulse laser; monocrystalline silicon solar cell; damage effect

收稿日期: 2011-05-05; 修订日期: 2011-06-03

基金项目: 国防预研项目

作者简介: 邱冬冬(1985-), 男, 助理工程师, 硕士, 研究方向为激光与物质的相互作用。Email: qidoo@163.com

导师简介: 程湘爱(1966-), 女, 教授, 博士, 研究方向为激光与物质的相互作用。

0 引言

研究激光对材料、器件的损伤效应,对于探寻激光与物质的相互作用机理和优化光学器件的抗激光损伤特性都具有重要的理论和实际意义。关于激光对半导体光电探测器件的辐照效应,国内外已经开展了多年研究^[1-6]。但对太阳能电池的相关研究还很少。对此方面的研究主要集中在耐高能粒子辐射方面。单晶硅对波段内的光有强烈的本征吸收,结合超短脉冲激光的特点,波段内超短脉冲激光对单晶硅太阳能电池应具有很好的损伤效果。文中主要针对单晶硅太阳能电池的抗波段内超短脉冲激光损伤特性进行研究,研究了其在 532 nm、20 ns 和 300 ps 不同重频激光辐照下的损伤特性,对损伤机制进行了分析。开展这项研究,对丰富激光与太阳能电池的相互作用机理也是很有必要的。

1 实验

1.1 实验方法

太阳能电池是一种依靠半导体光伏效应,将太阳能直接转换成电能的半导体器件。单晶硅太阳能电池被开发较早,技术成熟,在太阳能电池中属转换效率较高的类型。单晶硅太阳能电池的结构如图 1 所示。描述太阳能电池输出性能的参数有短路电流 I_{SC} 、开路电压 V_{OC} 和最大输出功率 P_{MAX} 。参照图 2 所示的电路,上述参数的含义分别为 $R_L=0$ 时通过负载的电流值, $R_L=\infty$ 时负载两旁的电压和 R_L 能得到的最大功率,负载上的功率最大时的阻值也即最佳匹配电阻 R_0 。

实验对象为 2 cm×2 cm 的单晶硅太阳能电池,采用脉宽为 20 ns、重频 1 Hz 和脉宽 300 ps、重频 20 Hz

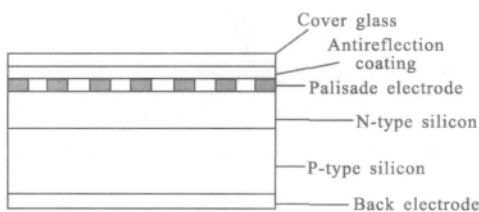


图 1 单晶硅太阳能电池的结构

Fig.1 Structure of monocrystalline silicon solar cell

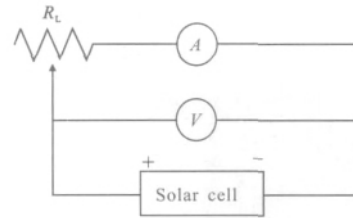


图 2 测试太阳能电池性能的外接电路

Fig.2 External circuit to test character of solar cell

的 532 nm 激光进行辐照,使太阳能电池前表面垂直朝向激光。卤钨灯在整个实验过程中一直照射在电池表面,其作用是提供使电池正常工作的背景光,形成一个实际工作状态的电路。为了尽可能减小背景灯照射带来的温度影响,卤钨灯放置在距离电池表面 1 m 以外的地方。He-Ne 光作为准直光,用于调整光路,在进行激光辐照实验时关闭。用衰减片调整激光能量。实验的光路布局如图 3 所示。

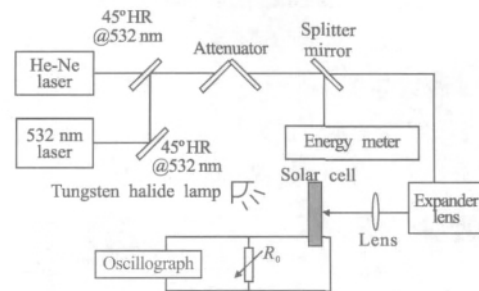


图 3 超短脉冲激光辐照太阳能电池实验光路

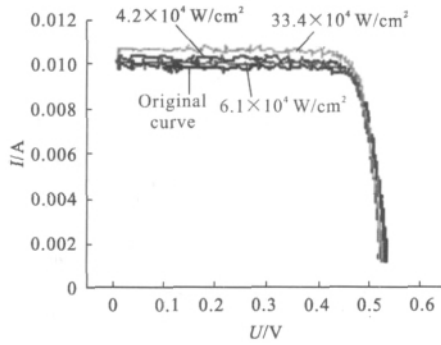
Fig.3 Experiment beam path of solar cells under ultrashort laser irradiations

在激光辐照之前,测一组电池的 $I-V$ 特性曲线,得出电池的最佳匹配电阻 R_0 ,激光辐照外接最佳匹配电阻的太阳能电池。激光辐照之后,再测量一组太阳能电池在卤钨灯照射下的 $I-V$ 特性曲线,用以检测电池性能的变化。

1.2 实验结果

1.2.1 20 ns 1 Hz 激光辐照单晶硅太阳能电池

激光经扩束之后不经过透镜辐照电池,光斑覆盖电池表面。在峰值功率密度为 $4.2 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 、 $6.1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 、 $3.3 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 的激光各辐照 10 个脉冲之后,电池表面形貌没有变化。分别测量电池的 $I-V$ 特性曲线,与激光未辐照时的 $I-V$ 曲线对比如图 4 所示,太阳能电池性能并没有衰退, P_{MAX} 均在 4.4 mW 左右。

图 4 太阳能电池被激光辐照后的 I - V 特性曲线Fig.4 I - V curves of laser-irradiated solar cell

加上聚焦透镜,把电池前表面置于焦点处,当单脉冲能量为 12.2mJ、峰值功率密度为 $6.7 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,单脉冲辐照,电池表面玻璃盖片出现裂痕, P_{MAX} 降为 4 mW,见图 5(a);峰值功率密度升至 $1.8 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 时,单脉冲辐照,玻璃盖片开始破裂,见图 5(b);辐照 100 个脉冲后玻璃盖片破碎,内部 PN 结表面出现破损, P_{MAX} 降至 2.8 mW,见图 5(c)。3 种辐照条件后 de 电池表面形貌如图 5 所示。激光辐照后测得的 I - V 特性曲线如图 6 所示。在激光停止辐照的 20h 和 40h 后, P_{MAX} 分别恢复至 3.53mW 和 3.85mW。

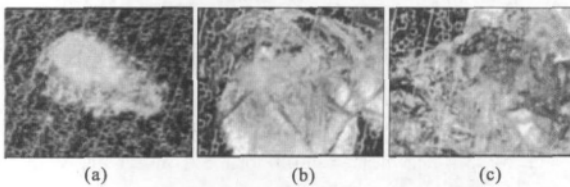
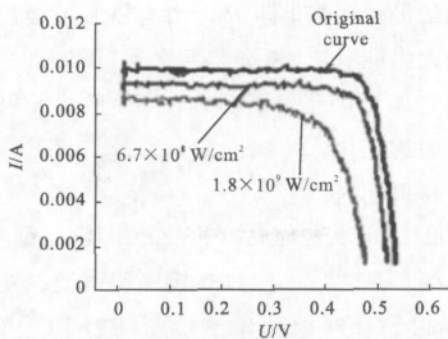


图 5 被不同功率密度激光损伤后的电池表面形貌

Fig.5 Surfaces of solar cell that damaged by laser at different powers

图 6 太阳能电池被激光破坏后的 I - V 特性曲线Fig.6 I - V curves of laser-destroyed solar cell

1.2.2 300 ps、20 Hz 激光辐照单晶硅太阳能电池

由于激光脉宽的降低,相同单脉冲能量的入射激光具有更高的峰值功率。图 7 给出了两种辐照条件

下电池的损伤形貌。当入射激光单脉冲能量为 26.2mJ、峰值功率密度为 $2.8 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 时,辐照 3 s 也即 60 个脉冲,电池表面玻璃被洞穿、PN 结区表面开始破损,电池的损伤比峰值功率密度为 $1.8 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 的 20 ns、1 Hz 激光辐照 100 个脉冲后的损伤效果严重,见图 7(a);峰值功率密度升至 $8.7 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$,辐照 180 s,电池就已经被击穿,没有发现熔融物,见图 7(b)。激光以峰值功率密度 $8.7 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ 辐照 10 min,在辐照过程中左右移动电池,在电池表面形成一道玻璃盖片破碎、内部 PN 结损伤的线。图 8 是表面被严重破坏后电池的 I - V 特性曲线与初始曲线的对比,可见电池性能已经严重衰退。

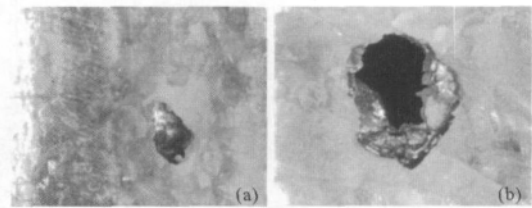
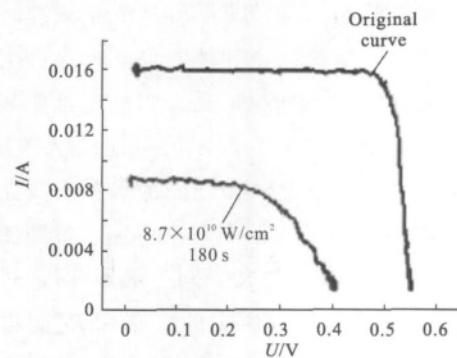


图 7 被激光破坏后的电池表面形貌

Fig.7 Surfaces of solar cell that destroyed by laser

图 8 太阳能电池被激光严重破坏后的 I - V 特性曲线Fig.8 I - V curves of solar cell that was destroyed by laser severely

1.3 分析及讨论

超短脉冲激光对太阳能电池的损伤效应主要表现为热力效应的破坏,聚焦后,这类激光具有非常高的峰值功率密度,能在瞬间在电池表面产生巨大的能量积累,在非常短的脉冲作用时间内,产生的热量不能及时传导出去,从而导致局部温度的急剧上升。在电池的上层表面产生了很大的温度梯度,由此造成了热应力的产生,再加上表层玻璃盖片和单晶硅材料都属于脆性材料,塑性区窄,热应力很容易对电池的组分材料产生破坏。由实验得知,在脉冲能量一

定时,激光脉宽越短,对太阳能电池的损伤效果越明显,因其对应更高的峰值功率,产生的热力耦合更大。实验中采用的 20 ns 和 300 ps 激光,脉冲间的间隔分别是 1 s 和 50 ms,经聚束后焦点处光斑很小,脉冲间隔的时间已经使焦斑及其附近的温度降低,脉冲之间的热积累效应不明显。激光脉冲对硅片表面有缺陷的点形成破坏,而破坏随着激光脉冲的增多而逐渐扩大,是脉冲累积效应。所以在单脉冲能量一定时,相同的激光辐照时间下,重频高的激光对电池的损伤效应也更明显。而由于长脉冲激光和连续激光辐照产生的热量有足够的时间进行对外传导并且有累积效应,在能量密度足够高时,电池的损伤表现为烧蚀熔融^[7-9]。

入射到太阳能电池的光,一部分被表面反射,一部分透射,一部分被电池吸收。吸收的那部分光中,光子能量大于硅禁带宽度的,大部分因带间吸收产生光生载流子,少部分转化成热能,光子能量小于禁带宽度的,全部转化成热能。因而,太阳能电池对波段内激光的响应主要以光生载流子效应为主,对波段外激光的响应主要以热效应为主。

同样是半导体材料,对波段内光的强烈本征吸收产生的光生载流子效应对太阳能电池和半导体光电探测器产生的影响是不同的。半导体光电探测器内部有着复杂的电路,光生载流子增加到一定程度产生漏电流能引起短路,从而产生破坏;功率密度高到一定程度则会依靠热效应发生同太阳能电池一样的物理破坏^[10]。相比而言,太阳能电池的内部没有电路,随着激光功率密度的提高而产生的大量载流子并不会对太阳能电池造成损伤,只有在激光功率密度达到一定程度时,利用热效应对电池造成的损伤,破坏内部 PN 结才能使太阳能电池在此区域丧失发电能力。

综上所述,太阳能电池的损伤主要是依靠激光的热效应,在足够的激光功率密度和辐照时间下,超短脉冲激光对太阳能电池造成碎裂破坏,长脉冲或连续激光对太阳能电池造成熔融。

2 结 论

实验研究了波段内超短脉冲激光对单晶硅太阳能电池的损伤效应,分析了损伤的机理。阐述了在激光单脉冲能量一定的情况下,损伤效果与脉宽和重频的关系。简要对比了激光对太阳能电池和光电探

测器的损伤机理,与它们的结构差异有很大的关系。实验发现,超短脉冲激光对太阳能电池的损伤主要表现为电池材料的碎裂,高功率密度、高重频的激光连续辐照,可将太阳能电池击穿;激光对太阳能电池的破坏,主要是依靠热效应。

参考文献:

- [1] Zhong Hairong, Liu Tianhua, Lu Qisheng, et al. Analysis of threshold of laser damage in photoelectric detectors[J]. *Laser Journal*, 2001, 22(4): 1-5. (in Chinese)
- [2] Ma Liqin, Lu Qisheng, Du Shaojun. Dynamic responses of photoconductive detectors under high power laser irradiation[J]. *Journal of Optoelectronic-Laser*, 2005, 16(2): 155-158. (in Chinese)
- [3] Flora M Li, Nixon O, Arokia Nathan. Degradation behavior and damage mechanisms of CCD image sensor with deep-UV laser radiation [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, 51(12): 2229-2236.
- [4] Wang Rui, Si Lei, Cheng Xiang'ai. The experiment study on opto-thermal effects of detector irradiated by laser in its response waveband[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(8): 786-788. (in Chinese)
- [5] 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 and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 481-484. (in Chinese)
- [6] Han Jinghua, Feng Guoying, Yang Liming, et al. Laser induced damage morphology of K9 glass with nanosecond pulse[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 37-41. (in Chinese)
- [7] Gao Weidong, Tian Guanglei, Fan Zhengxiu, et al. Laser damage process in single-crystalline silicon with different 1 064 nm Nd:YAG laser modes [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2005, 23(3): 317-320. (in Chinese)
- [8] Jiang Houman, Cheng Xiang'ai, Li Wenyu. Response of silicon p-n junction solar cell to DF laser irradiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(1): 22-25. (in Chinese)
- [9] Lv Wei, Qie Yipeng, Su Bin. Study of laser-induced damage to solar cell [C]//The 29th Annual Power Sources, 2006. (in Chinese)
- [10] Zhong Hairong, Liu Tianhua, Lu Qisheng, et al. Review on the laser-induced damage mechanism study of photoelectric detectors [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(4): 423-428. (in Chinese)