

## 飞秒超短脉冲激光对硅太阳能电池的损伤阈值研究

田秀芹,肖 思,陶少华,袁战忠,周炎强

(中南大学 物理与电子学院 超微结构与超快过程研究所,湖南 长沙 410000)

**摘 要:**首次采用飞秒超短脉冲激光( $\leq 35$  fs),研究其对硅太阳能电池的损伤阈值。与相同波长的连续激光对比,飞秒激光的损伤阈值略高。这一结果不同于纳秒或皮秒激光,主要是因为当加热脉冲时间相当或小于电子-声子耦合时间时,非热平衡效应显著,热传导现象不再满足 Fourier 定律。在实验中采用了光束整形技术,首次采用强度均匀分布的激光研究损伤阈值。此技术能减小高斯激光中心光强过大造成的实验偏差。

**关键词:**飞秒超短脉冲激光; 太阳能电池; 损伤阈值; 光束整形

**中图分类号:** TN249    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0676-05

## Damage threshold research of monocrystalline silicon solar cells under femtosecond laser illumination

Tian Xiuqin, Xiao Si, Tao Shaohua, Yuan Zhanzhong, Zhou Yanqiang

(Institute of Super Microstructure and Ultrafast Process, School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410000, China)

**Abstract:** Femtosecond laser with ultrashort pulse ( $\leq 35$  fs) was first applied to investigate damage threshold of a monocrystalline silicon solar cell. Compared with a continuous-wave laser of the same central wavelength, a femtosecond laser pulse was found to have a slightly higher damage threshold. Unlike nanosecond or picosecond lasers, the femtosecond laser has heating pulse time equal to or shorter than the electron-phonon coupling time. Thus, the thermal non-equilibrium effect becomes obvious, and the heat conduction phenomenon no longer meets the law of Fourier. In the damage threshold experiments, a beam shaping technique was applied for a femtosecond laser to generate uniform intensity distribution, which could prevent experimental deviation caused by great concentrated intensity distribution of a conventional laser pulse with the Gaussian profile.

**Key words:** femtosecond laser with ultrashort pulse; silicon solar cells; damage threshold; beam shaping

收稿日期:2013-07-17; 修订日期:2013-08-03

基金项目:国家青年科学基金(11104356)

作者简介:田秀芹(1987-),女,硕士生,主要从事非线性光学、超快动力学方面的研究。Email:txqxf@163.com

导师简介:肖思(1981-),男,硕士生导师,博士,主要从事非线性光学、超快动力学方面的研究。Email:sixiao@csu.edu.cn

## 0 引言

利用激光可以把能量远距离传输到接收光伏阵列,从而实现能量的远距离传输,这在航天领域有很大的应用前景<sup>[1]</sup>。并且激光在地面比在太空中更容易操作和维护,并实现无损无线超远距离传输<sup>[2]</sup>。经过研究,太阳能电池在激光能量传输应用中可以作为接收器,若设计以特定的单色光为接收光源,会具有更高的能量转化效率<sup>[3]</sup>。但目前的问题是,若瞬间能量密度过高,超过其损伤阈值,会导致太阳能电池的转化效率显著降低。因此,如果能在保证电池正常使用的前提下,更多更快地传输能量,成为了激光无线传能研究的重点。

此外,2013年1月12日,德国莱茵金属防务公司公布了一种新型的激光武器,功率达到了50 kW,能击落2英里(1 mile=1.6093 km)外的无人机。随着激光武器逐渐投入使用,研究激光对物质的损伤阈值问题也成为了国际研究的热点。

国外关于激光对太阳能电池的损伤效应的研究公开报道很少;国内部分研究者开展了不同波段<sup>[4-5]</sup>的激光照射硅太阳能电池以及其它相关研究,但是大多集中在脉冲宽度介于 $10^{-8}$ ~ $10^{-13}$  s的纳秒、皮秒脉冲激光或连续激光,结论均为脉冲激光的损伤阈值要小于连续激光,即更容易损伤太阳能电池。并且,没有进行严格意义上的相同波长的脉冲和连续激光对太阳能电池照射结果的比较。

飞秒超短脉冲激光有非常高的瞬间功率,为能量的快速、大量传输提供了一种可行的手段。硅太阳能电池中的电子-声子耦合时间、热平衡时间、电子温度和晶格温度延迟时间均在皮秒或者亚皮秒量级,均大于飞秒量级<sup>[6]</sup>。这极有可能导致飞秒脉冲激光对太阳能电池的损伤阈值的变化规律有所不同。可惜的是,目前尚无这方面的研究报道。

另外,值得注意的是,以前实验<sup>[4-5]</sup>所采用激光均为未整形的高斯光束(高斯光束光强分布不均匀,中心光强过大),因此可能会出现光斑聚焦中心过早损坏,导致实验出现偏差。因此,要测得真实的损伤阈值,要求对实验测试体系进行重大的改善。

文中采用飞秒脉冲和连续两种形式的同一波长(800 nm)的激光对硅太阳能电池进行照射。研究表

明,飞秒激光的损伤阈值略高,这一结果完全不同于纳秒或皮秒激光。此外,对实验测试体系进行了重要的改进:一,选用激光波长为800 nm。这是因为硅太阳能电池的盖玻片对800 nm激光吸收小,不会受到损伤,避免了盖玻片损伤对测试结果的影响。二,首次对采用激光进行光束整形,强度由高斯分布变为均匀分布。这样可以充分利用太阳能电池的采光面积,使其被均匀照射;防止了照射强度未达到损伤阈值但中心光强过大损坏中心处的太阳能电池,导致结果出现偏差。三,与其他可见波长相比,800 nm激光光子能量较小,等效电子温度的相应峰值较小<sup>[7]</sup>,能够传输更多的能量。

## 1 实验

### 1.1 实验原理

太阳能电池被光照射时,其光敏材料的价带电子能够吸光子跃迁至导带成为载流子,从而实现光能到电能的转换。但是由于在这一过程中载流子的运动加剧,有些价带电子在吸收了光子后并未跃迁至导带,而是跃迁至杂质等中间能级,或在禁带中成为激子,没有将光能转化为电能而是直接转变成热能积聚在太阳能电池内部,产生热效应,使得太阳能电池被照射区域温度升高。当光照强度达到一定强度,产生的热量不能及时扩散出去,热效应会对太阳能电池的光敏材料造成不可逆的破坏。此外,飞秒激光与材料的相互作用时间非常短,会在薄膜表面甚至内部形成电子温度很高、离子温度较冷的等离子体。这样的等离子体不能稳定存在,会迅速膨胀,造成材料的损伤<sup>[8]</sup>,这些将导致太阳能电池的转化效率明显下降。当太阳能电池的转化效率出现明显下降时,此时所对应的光源功率即为某一光源对太阳能电池的损伤阈值。只要激光功率未达到损伤阈值,可将激光作为照射光源。由于其能量高度集中、方向性好,能进行无线远距离传送;且其单色性较高,能以较高的转化效率被太阳能电池吸收并转化为电能存储或利用,从而实现高能激光远距离传能。

### 1.2 实验系统

实验系统如图1所示。采用光谱物理公司Tsunami激光器型号(3941-30-MIS)产生重复频率76 MHz,脉宽小于35 fs,带宽约为50 nm的激光(中心波长位于800 nm)。利用聚焦透镜-微孔-聚焦透镜

组合进行光束整形,获得强度均匀分布的飞秒激光。现在所用微孔的直径为  $100\ \mu\text{m}$ , 预计直径更小的微孔可以使激光光强更加匀化。另外,下一步计划在透镜 2 之后加入空间光调制器(spatial light modulator, SLM),通过在 SLM 上加载 GS 算法设计的相位全息图<sup>[9]</sup>对光束进行整形,就可在硅太阳能电池平面上形成高度均匀的光强分布。所用频谱仪是海洋光学公司的 USB4000 频谱仪,利用衰减片控制激光强度,采用物理光谱公司 407 A 功率计测量激光光强。采用理波公司 91160s 电流电压测试系统测量单晶硅太阳能电池的转化效率变化。单晶硅太阳能电池由广州兆天太阳能科技有限公司提供,面积为  $33\ \text{mm}\times 33\ \text{mm}$ 。

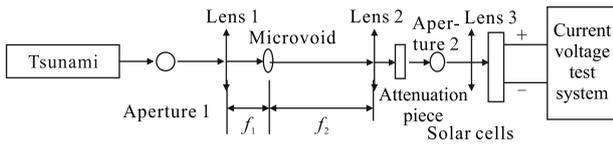


图 1 实验系统示意图

Fig.1 Diagram of the experimental system

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 实验结果

利用聚焦透镜-微孔-聚焦透镜组合进行光束整形,获得了强度均匀分布的飞秒激光作为照射光源。为了证明已实现有效强度均匀化分布,进行了如下实验:调整光路使图 1 中激光光束中心与光阑中心重合,并将功率计分别置于光阑 1 和光阑 2 之后。改变光阑孔径的大小,则可以测量整形前和整形后激光功率随光斑直径变化的分布情况。图 2(a)为测量结果。方块数据为整形前的激光光强分布,接近理论计算得出的高斯分布曲线;三角数据为整形后的激光强度分布,接近理论计算得出的平均分布曲线。实验证明,通过光束整形后的激光光束可以被认为是均匀光强分布。

利用频谱仪测量整形后的激光波长,得到结果如图 2(b)所示。脉冲激光的光谱半高宽约为  $50\ \text{nm}$ ,对应的激光脉冲时间应小于  $35\ \text{fs}$ ,远小于皮秒或亚皮秒量级的电子-声子耦合时间、热平衡时间等。脉冲和连续激光的中心波长均在  $800\ \text{nm}$  左右,光子能量较小,等效电子温度的相应峰值小,且避免了盖玻片损伤对测试结果的影响。

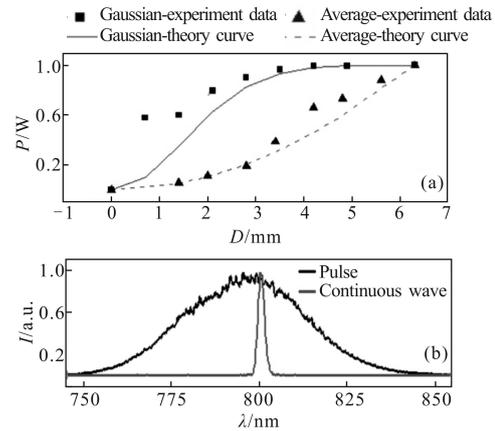


图 2 归一化的激光功率随光斑直径增加的变化趋势及波长中心在  $800\ \text{nm}$  处的脉冲和连续激光光谱

Fig.2 Normalized laser power vs increase of light spot diameter, and pulse and continuous laser spectrum with center at  $800\ \text{nm}$  wave length

实验过程中,激光照射面积保持不变,功率从  $0\ \text{W}$  逐渐上升至  $1.0\ \text{W}$ ,幅度为  $0.1\ \text{W}$ 。在飞秒和连续两种模式下,对太阳能电池片进行照射,然后利用电压电流测试系统测试其转化效率。每次照射持续时间为  $15\ \text{min}$ ;两次照射时间间隔为  $10\ \text{min}$ 。图 3 为使用强度均匀分布的飞秒激光照射太阳能电池,逐渐增大光强后得到的转化效率变化曲线。插图是功率分别为  $0.2\ \text{W}$ 、 $0.6\ \text{W}$ 、 $0.8\ \text{W}$  的飞秒激光照射后的  $I-V$  曲线。如图 3 所示,在脉冲模式下,当激光功率大于  $0.4\ \text{W}$  时,太阳能电池的转化效率有了明显的

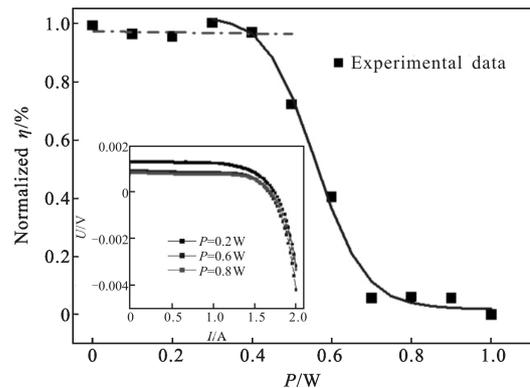


图 3 飞秒脉冲激光照射下太阳能电池转化效率随功率增大的变化(当  $\text{Normalized } \eta=1$  时,转化效率为  $4.3645\%$ )

Fig.3 Conversion efficiency of solar cells vs power of femtosecond pulsed laser(when normalized  $\eta$  is 1, conversion efficiency is  $4.3645\%$ )

下降。因此可以判定,在此测试环境中,飞秒脉冲激

光的损伤阈值约为 0.4 W 左右。

图 4 为使用均匀强度分布的连续激光照射太阳能电池,逐渐增大光强后得到的转化效率变化曲线;插图为用功率分别为 0.2 W、0.6 W、0.8 W 的连续激光照射后的  $I-V$  曲线。如图 4 所示,在连续激光模式下,当激光强度大于 0.3 W 时,太阳能电池的转化效率开始急剧下降,且当功率逐渐增大时,太阳能电池的转化效率持续下降。因此可以判定,在与脉冲激光相同的测试环境中,连续激光的损伤阈值约为 0.3 W 左右,略小于脉冲激光。这意味着相对于连续激光,硅太阳能电池能承受更强的脉冲激光。

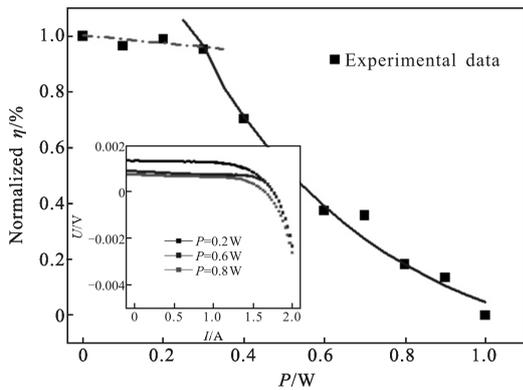


图 4 连续激光照射下太阳能电池转化效率随功率增大的变化  
(当 Normalized  $\eta=1$  时,转化效率为 3.0549%)

Fig.4 Conversion efficiency of solar cells vs power of CW laser  
(when normalized  $\eta$  is 1, conversion efficiency is 3.0549%)

## 2.2 实验分析

硅的禁带宽度为 1.11 eV, 其本征吸收长波限为 1.12  $\mu\text{m}$ 。波长为 800 nm 的光子的能量可以使价带电子直接跃迁至导带成为光生载流子;而保护太阳能电池的盖玻片可视为对其透明。从图 3 和图 4 可知,硅太阳能电池在低光强激光的连续照射下,转换效率没有发生明显变化。这几点说明:可以采用波段内(波长小于本征吸收长波限的波段)小于阈值的激光光束进行高能远距离传能。

当功率过高、照射时间过长时,激光的热效应会对太阳能电池造成不同程度、不同形式的物理破坏,从而使其性能发生不可恢复的下降。根据现有参考文献[10],连续激光对太阳能电池的损伤形式主要是热熔损伤;纳秒激光对太阳能电池的损伤形式主要是热力损伤。这些损伤过程弛豫时间均处在纳秒和皮秒量级之间,远大于文中所用的超短飞秒脉冲

时间。对于超短脉冲加热问题,应当采用 Anisimov 等人在 1974 年提出来的双温度模型(Two Temperature Model, TTM)<sup>[11]</sup>。此模型基于微观物理,认为金属内分别存在电子温度和声子(晶格)温度。当加热脉冲的时间与电子-声子耦合时间(飞秒量级)相当或更小时,非平衡热效应出现,热传导现象不再满足 Fourier 定律。根据此模型进行的飞秒泵浦-探测实验<sup>[7]</sup>证明,当加热脉冲时间为飞秒量级时,温度的变化满足 TTM 模型,温度下降速度约为 Fourier 模型的两倍。而且,由于实验采用的飞秒激光的占空比约为  $10^{-6}$  量级,也就是脉冲之间的间隔时间是脉宽的  $10^6$  倍以上,脉冲之间的间隔时间已经足够让硅在激光脉冲作用时间内的急剧上升的温度下降到正常温度,因此脉冲之间没有热积累效应。多脉冲辐射的效果只是脉冲积累的效果。

可以观测到,连续激光的强度超过损伤阈值后,太阳能电池的转换效率也随之下降,但下降趋势较为缓和,在测量范围内没有达到饱和的最小值;但当飞秒脉冲激光的强度超过损伤阈值时,太阳能电池的转换效率迅速下降(0.4~0.7 W 区间),并在 0.7 W 时达到最小转换效率并保持稳定。这可能因为连续激光对太阳能电池的损伤形式主要是热熔损伤,强度超过阈值后,损伤效果和激光强度成线性正比关系;而飞秒脉冲激光的强度超过阈值后,出现了非线性的热效应,损伤效果与激光强度呈现高次关系而导致转换效率的迅速下降达到饱和值。

根据以上分析:一方面,超短飞秒脉冲激光导致的高温会比连续或长脉冲激光更快下降;另一方面,超短飞秒脉冲激光有更好的占空比,没有热积累效应。两者综合导致了超短飞秒脉冲激光的损伤阈值略高于连续激光这一结果不同于纳秒或皮秒激光的结果。

## 3 结论

首次采用飞秒超短脉冲激光( $\leq 35$  fs)研究其对硅太阳能电池的损伤阈值。与相同波长的连续激光对比,飞秒激光的损伤阈值略高。这一结果主要是因为当加热脉冲的时间相当或小于电子-声子耦合时间时,热传导现象不再满足 Fourier 定律,温度下降更快。这意味着以太阳能电池为接收器件的远距离传能系统中,在不考虑传输介质对哪种激光损耗更强的情况下,为能在短时间内传输更多的能量,使用

超短飞秒脉冲激光更具优势。这一结果完全不同于纳米、皮秒激光的实验结论。另外,实验中第一次引入了简易可行的光束整形系统,将高斯光束变为强度均匀分布光束,有效减小了高斯激光中心光强过大造成的实验偏差,属于测试系统的重大改进。

#### 参考文献:

- [1] Roland A Lowe, Geoffrey A Landis, Phillip Jenkins. Response of photovoltaic cells to pulsed laser illumination [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1995, 42(4): 744-751.
- [2] Raj K Jain. Calculated performance of indium phosphide solar cells under monochromatic illumination [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1993, 40(10): 1893-1895.
- [3] Jane A Yatert, Roland A Lowe, Phillip P Jenkins, et al. Pulse laser illumination of photovoltaic cells [C]//IEEE First WCPEC, Hawaii, 1994: 2177-2180.
- [4] 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)  
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]. 红外与激光技术, 2008, 37(3): 481-484.
- [5] 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)  
王睿, 司磊, 程湘爱. 波段内激光辐照光电探测器的光热效应实验研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(8): 786-788.
- [6] Liu Guodong, Luo Fu, Wang Guibing, et al. Numerical simulation of ultrafast energy transport in monocrystalline silicon films under femtosecond laser irradiation [J]. *Applied Optics*, 2009, 30(2): 325-329. (in Chinese)  
刘国栋, 罗福, 王贵兵, 等. 飞秒激光辐照下单晶硅薄膜中超快能量运输的数值模拟 [J]. 应用光学, 2009, 30(2): 325-329.
- [7] Zhu Jie, Tang Dawei, Cheng Guanghua, et al. Foundation of femtosecond laser pump-probe thermoreflectance system [J]. *Engineering Thermophysics*, 2008, 29(7): 1227-1230. (in Chinese)  
祝捷, 唐大伟, 程光华, 等. 飞秒激光泵浦-探测热反射系统的建立与调试[J]. 工程与物理学报, 2008, 29(7): 1227-1230.
- [8] Qiu Dongdong, Wang Rui, Cheng Xiang'ai, et al. Damage effect of monocrystalline silicon solar cells under ultrashort pulse laser irradiations [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 112-115. (in Chinese)  
邱冬冬, 王睿, 程湘爱, 等. 超短脉冲激光对单晶硅太阳能电池的损伤效应 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 112-115.
- [9] Chen Xiaoxi, Huang Ziqiang, Yang Wenjun. Controllable system and design algorithm for laser beam shaping using optical addressing liquid crystal spatial light modulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 47-50. (in Chinese)  
陈晓西, 黄子强, 杨文君. 光寻址液晶空间光调制器用于激光光束整形的可控系统和设计算法 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 47-50.
- [10] Zhang Hongying, Wu Shigang. The dynamic process of thin films damage induced by femtosecond laser [J]. *Acta Phys Sics*, 2007, 56(9): 5314-5317. (in Chinese)  
张红鹰, 吴师岗. 飞秒激光作用下薄膜破坏的力学过程 [J]. 物理学报, 2007, 56(9): 5314-5317.
- [11] Anisimov S I, Kapeliovich B L, Perel'man T L. Electron emission from metal surfaces exposed to ultra-short laser pulses[J]. *Soviet Phys JETP*, 1974, 66(2): 375-377.