

文章编号: 1001-3806(2011)05-0632-04

连续激光对太阳能电池辐照效应的波段性研究

邱冬冬^{1,2}, 王睿¹, 程湘爱¹, 孙永江²

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

摘要: 为了研究太阳能电池在连续激光辐照下的波段性效应, 使用位于波段内外的3种波长连续激光对单晶硅太阳能电池的辐照效应和损伤效应进行了实验研究, 采用观察电池对激光的响应, 对比电池的损伤形貌和太阳能电池组成材料的吸收曲线差异的方法, 得到了太阳能电池对本征吸收长波限附近波长激光的吸收机制, 分析了10.6 μm 激光和1064nm激光对太阳能电池的损伤效果差异的原因。结果表明, 玻璃盖片和硅对不同波长激光的吸收系数的很大差距是造成它们对太阳能电池的损伤效果差异的原因。

关键词: 激光技术; 吸收机制; 损伤效应; 吸收系数; 波段内外连续激光; 单晶硅太阳能电池

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.016

Wave band effect of solar cells under irradiation of CW laser

QIU Dong-dong^{1,2}, WANG Rui¹, CHENG Xiang-ai¹, SUN Yong-jiang²

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

Abstract: In order to find the wave band effect of solar cells under irradiation of continuous wave (CW) laser, the irradiation effect and damage effect of monocrystalline silicon solar cells were studied under the irradiation of three kinds of in-band or out-of-band CW laser. The response of solar cell to laser was observed. Then, the damage morphology of the cell and the absorption curves of its original material were compared, and the absorption mechanism of solar cells at the wavelengths near the intrinsic absorption long wavelength threshold was obtained. Finally, the reason for different damage results induced by 10.6 μm laser and 1064nm laser was analyzed. The results show that the great difference between the absorption coefficients of cover glass and silicon at different laser wavelengths is the reason for different damage results to solar cells.

Key words: laser technique; absorption mechanism; damage effect; absorption coefficient; in-band and out-of-band continuous wave laser; monocrystalline silicon solar cell

引言

太阳能电池作为各种类型航天器的电源, 是空间领域应用中的核心部分。太空中有密度很高的高能粒子, 太阳能电池被其辐照之后, 输出性能会发生严重下降。国外从20世纪60年代起就开展了关于各种能量的质子、中子和电子辐照太阳能电池的实验和理论研究^[1-4], 国内从20世纪90年代以来也进行了一些相关研究^[5-9]。太阳能电池阵是表面积最大的部分, 当受到激光辐照时, 太阳能电池阵就成为了主要的受光体, 研究激光对其损伤效应是很有必要且极具意义的。关于激光辐照太阳能电池研究的公开报道很少, 关于连续激光对太阳能电池的辐照效应的波段性研究更是鲜见报道。

连续激光具有很高的平均功率, 且输出稳定, 持续的辐照很容易对太阳能电池造成损伤。作者针对3种不同波长的连续激光辐照太阳能电池出现的不同辐照效应或损伤结果进行研究, 得到了太阳能电池对长波限附近波段外激光的响应机制和太阳能电池的损伤结果与太阳能组成电池材料的波长响应特性之间的关系。

1 实验

1.1 实验布局

实验对象为中电集团天津18所研制的单晶硅太阳能电池, 面积为2cm \times 2cm, 采用连续激光进行辐照。单晶硅电池的结构如图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。最常用的玻璃盖片是熔融石英盖片和掺铈玻璃盖片, 前者应用广泛, 很具有代表性,

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。

E-mail: qidooo@163.com

收稿日期: 2010-09-28; 收到修改稿日期: 2010-10-11

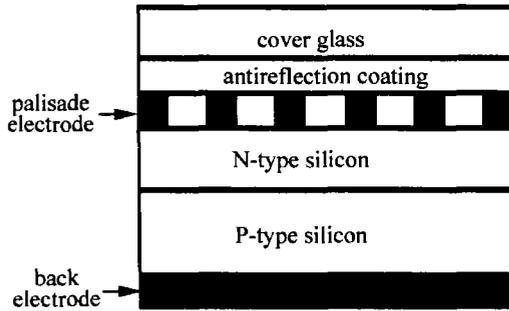


Fig. 1 Cross section of a monocrystalline silicon solar cell

本实验的样品也是采用熔融石英玻璃盖片。

图2是实验布局图。卤钨灯放置在距离电池前表面1.2m处;示波器用来监测并记录负载电压的变化;窄带滤光片为了滤除杂光对辐照实验的影响;K型热电偶接在电池的背面,监测辐照过程中电池的温度变化;多功能测量仪接在负载两旁,记录和监测负载的电压变化。

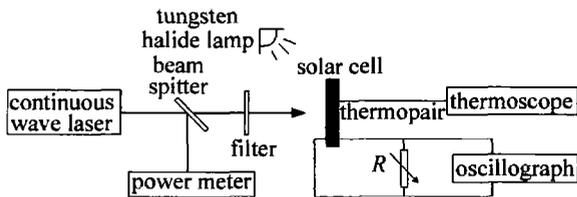


Fig. 2 Beam path of the experiment

激光辐照前,测量一组单晶硅电池伏安(*I-V*)特性曲线;激光辐照过程中,把电池外接负载的电阻值调为无穷大,监测电池的开路电压和温度变化;激光停照后再测量一组*I-V*曲线。通过对比激光辐照前后单晶硅电池的输出特性曲线变化的方法判断电池性能的变化情况。

1.2 实验结果

1.2.1 1319nm 激光的辐照实验结果 关闭卤钨灯,用功率为9.7W的激光辐照太阳能电池170s。图3所示为多功能测量仪记录的辐照过程中电池的温度和开路电压变化。如图所示,在激光开始辐照后,电池的开路电压从12mV逐渐上升,并稳定在48.5mV左右。

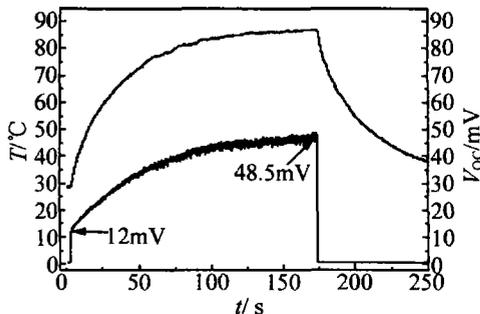


Fig. 3 Variation of *T* and *V_{oc}*

激光辐照前,测一组电池的*I-V*特性曲线,得到最大输出功率 $P_{max} = 4.61\text{mW}$ 。使激光的功率为14.6W,太阳能电池表面处光斑大小 $\varnothing 2.5\text{mm}$,平均功率为 $3 \times 10^2\text{W/cm}^2$,辐照电池150s,电池表面没有变化,辐

照后测量电池的*I-V*曲线, $P_{max} = 4.35\text{mW}$ 。调整激光功率至8.9W,电池表面处光斑大小 $\varnothing 1\text{mm}$,平均功率 $1.13 \times 10^3\text{W/cm}^2$,辐照电池90s,电池表面仍没有变化,辐照后测量电池的*I-V*曲线, $P_{max} = 4.63\text{mW}$ 。辐照前后电池的*I-V*曲线与功率曲线对比如图4所示,电池的性能没有发生下降。

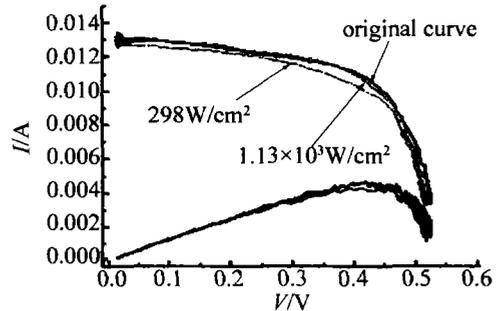


Fig. 4 Contrast of *I-V* curves before and after laser irradiation

1.2.2 10.6μm 激光的辐照实验结果 使用波长为10.6μm的激光进行辐照实验,光斑大小为 $\varnothing 3\text{mm}$ 。当激光功率为14.3W、功率密度为 $2.0 \times 10^2\text{W/cm}^2$ 时,辐照单晶硅电池30s,光斑处玻璃盖片发生轻微熔融且周围出现裂纹,光斑处玻璃盖片与抗反射涂层之间出现空隙 P_{max} 从4.06mW降至3.65mW。

把激光功率升至25.5W,平均功率密度为 $3.7 \times 10^2\text{W/cm}^2$,辐照单晶硅电池80s,光斑处的玻璃盖片发生熔融,光斑处周围玻璃盖片与抗反射涂层出现空隙,空隙边缘是圆形裂纹,硅电池体被烧蚀。单晶硅电池被辐照后的损伤形貌如图5a所示,图5b为激光辐照前后电池的*I-V*特性曲线的对比情况。 P_{max} 从4.46mW降为3.1mW。

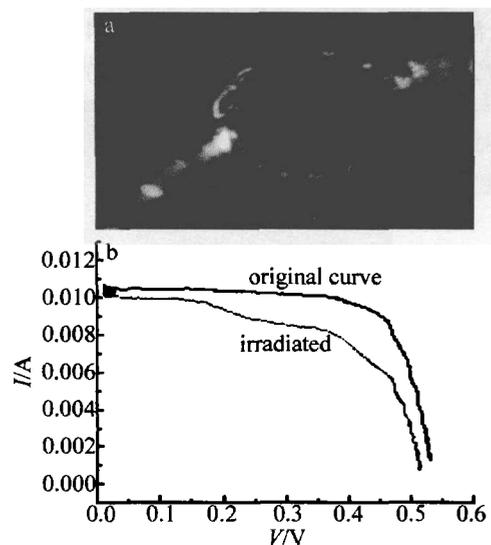


Fig. 5 Morphology and *I-V* curve of monocrystalline silicon cell irradiated by 10.6 μm laser (25.5W, $3.7 \times 10^2\text{W/cm}^2$, 80s) a—morphology b—*I-V* curves

继续升高激光功率至31W,激光功率密度为 $4.4 \times 10^2\text{W/cm}^2$,辐照单晶硅电池50s,单晶硅电池的玻璃盖

片形成了图 6a 所示的熔坑,熔坑直径约 5mm,光斑处 PN 结层被严重烧蚀。跟上述两种情况一样,光斑周围区域的玻璃盖片与抗反射涂层之间出现空隙,空隙边缘是圆形的裂纹。图 6a 是电池被烧蚀的形貌,图 6b 是电池 $I-V$ 特性曲线在激光辐照前后的对比情况,可以看出,辐照后的输出特性曲线都已经接近成为直线。 P_{\max} 从 4.06mW 降至 1.37mW。

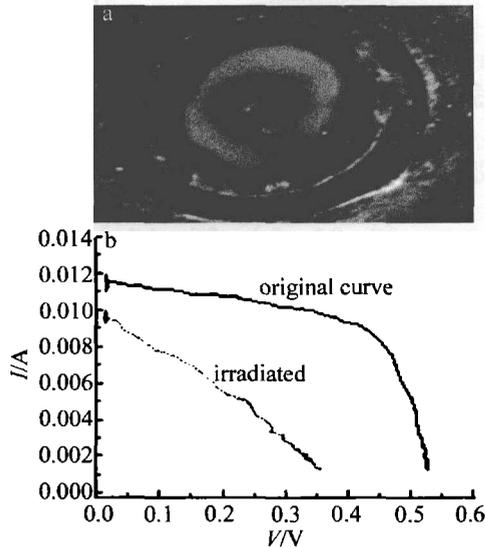


Fig. 6 Morphology and $I-V$ curve of monocrystalline silicon cell irradiated by $10.6\mu\text{m}$ laser (31W , $4.4 \times 10^2\text{W}/\text{cm}^2$, 50s)
a—morphology b— $I-V$ curves

1.2.3 1064nm 激光的辐照实验结果 使用波长为 1064nm 的激光进行辐照实验,光斑直径为 3mm。当激光功率为 14.2W、平均功率密度为 $2 \times 10^2\text{W}/\text{cm}^2$ 时,辐照电池 100s,电池没有发生任何变化, P_{\max} 从辐照前的 3.44mW 变为 3.41mW,没有发生性能下降。

电池不变,提高激光的功率至 19.4W、平均功率密度为 $2.8 \times 10^2\text{W}/\text{cm}^2$,辐照电池 70s,光斑处的电池

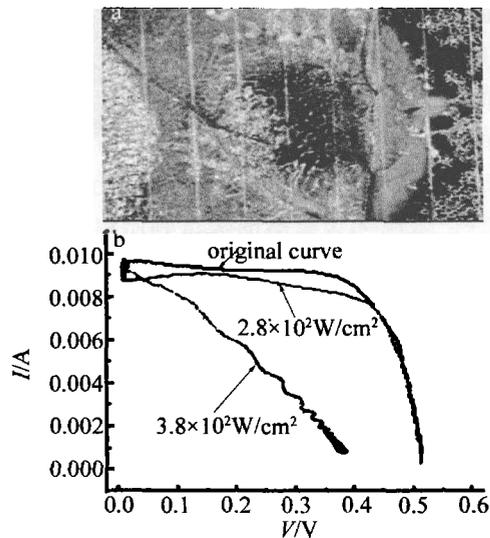


Fig. 7 Morphology and $I-V$ curve of monocrystalline silicon cell irradiated by 1064nm laser (19.4W , $2.8 \times 10^2\text{W}/\text{cm}^2$, 70s)
a—morphology b— $I-V$ curves

颜色发生轻微变化,玻璃片出现条形裂纹;电池的 P_{\max} 降至 3.29mW。继续升高激光功率至 26.6W、平均功率密度为 $3.8 \times 10^2\text{W}/\text{cm}^2$,光斑位置不变,辐照电池 70s,硅电池体被烧蚀(辐照过程中硅升温变红),表面玻璃盖片发生轻微的形变, P_{\max} 降至 1.26mW。辐照前后电池输出特性曲线对比和损伤形貌如图 7 所示。

将激光功率增加至 31.3W,激光平均功率密度为 $4.4 \times 10^2\text{W}/\text{cm}^2$,辐照电池 40s,电池表面玻璃盖片发生较明显形变,产生数条裂纹,硅电池体被烧蚀。 P_{\max} 从最初的 3.84mW 降至 1.52mW。辐照前后电池输出特性曲线对比和损伤形貌如图 8 所示。

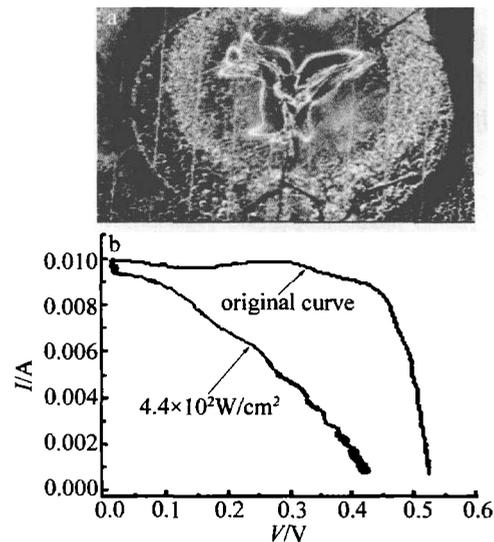


Fig. 8 Morphology and $I-V$ curve of monocrystalline silicon cell irradiated by 1064nm laser (31.3W , $4.4 \times 10^2\text{W}/\text{cm}^2$, 40s)
a—morphology b— $I-V$ curves

2 分析与讨论

硅的禁带宽度 $E_g = 1.11\text{eV}$,经计算可得其本征吸收的长波上限为 $1.12\mu\text{m}$,波长大于此值的光子的能量不足以使位于价带的硅电子直接跃迁至导带。实验结果显示,硅对 1319nm 的激光有响应,说明硅对 1319nm 的光有本征吸收以外的其它吸收机制。待电池的输出逐渐稳定后遮住激光,电池的温度缓慢下降,而开路电压 V_{oc} 迅速降至 0,由此判断电池的输出是由光而不是热导致。可能存在的吸收机制有以下几种。

(1) 多光子吸收:在高强度激光束的照射下,存在一种非线性光学效应,半导体材料可能同时吸收多个能量小于禁带宽度的相位相关的光子使位于价带的电子跃迁至导带。

(2) 杂质吸收:组成太阳能电池的硅都是掺杂硅,即使是比较纯净的半导体材料,也存在一定数量在制造过程中引入的杂质。束缚在杂质能级上的电子或空穴也可以引起光的吸收。电子可以吸收光子跃迁到导

带能级;空穴也可以吸收光子而跃迁到价带。

(3)激子吸收:理论和实验都说明,如果光子能量 $h\nu < E_g$,价带电子受激发后虽然跃出了价带,但还不足以进入导带而称为自由电子,仍然受到空穴的库伦场作用。受激电子和空穴互相束缚而结合在一起成为一个新的系统,这种系统称为激子。激子在晶体中某一部位产生后,可以在整个晶体中运动;但由于它作为一个整体是电中性的,因此不形成电流。在运动过程中,热激发或其他能量的激发使激子分离成为自由电子或空穴^[10],从而与本征吸收产生的光生载流子一样的效果。

以上几种吸收机制的存在,加宽了硅的吸收长波限,理论上讲,对于本征吸收长波限附近的特定波长或波长段也应该存在。

在同等功率和功率密度下,1064nm 激光与 10.6 μm 激光对单晶硅太阳能电池的损伤效果相差不大,损伤结果也没有本质的不同:同样是在激光功率密度低时,不能对电池造成损伤,电池只是在辐照过程中因为温度升高而发生性能暂时下降,当停止辐照从而温度降低之后,性能也会随之恢复;当激光功率和功率密度升高到一定程度之后,对太阳能电池进行持续辐照,激光因其热效应对电池造成不同程度、不同形式的物理破坏,从而使电池的性能产生不同程度不可恢复的下降。

损伤结果的差异主要表现在损伤形貌的差别上:当激光功率密度大到足以对电池造成损伤时,10.6 μm 的激光损伤结果是使电池的玻璃盖片烧蚀成熔坑,而 1064nm 激光的损伤结果是玻璃盖片隆起变形而没有被烧蚀成熔坑。

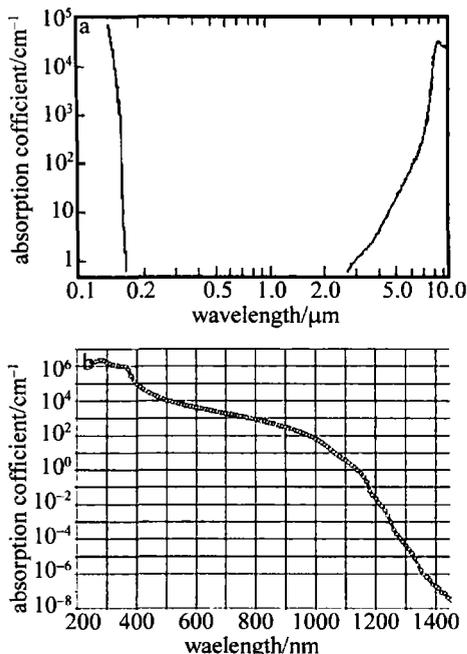


Fig. 9 Absorption curves of quartz crystal and silicon
a—quartz crystal^[11] b—silicon

固体材料的吸收公式为:

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

式中, I_0 为入射光强, α 为吸收系数, I 是光在物质中传播 x 距离后的光强。

石英晶体和硅的吸收曲线如图 9 所示。可以看出,玻璃对 10.6 μm 的光强烈吸收,吸收系数在 $10^4/\text{cm}$ 量级,而硅对这一波长的光透明。玻璃盖片和硅层的典型厚度分别为 0.15mm 和 0.2mm^[12]。由(1)计算可得,玻璃片几乎全部吸收了 10.6 μm 激光的能量,从而温升幅度很大,被严重烧蚀成熔坑,硅主要是受到玻璃盖片的传导热而损伤。对于 1064nm 的激光,则正好相反,硅较强的吸收 1064nm 激光,吸收系数在 $10/\text{cm}$ 量级,而玻璃对 1064nm 的光透明,计算可得,激光的能量几乎全部被硅吸收,而玻璃的受热是硅的传导热,变形严重但是自身烧蚀相对较轻。

玻璃和硅对 1319nm 光的吸收系数都很小,导致同等功率和功率密度甚至更高功率密度的 1319nm 光并没有对电池造成物理损伤,从而电池的性能没有出现下降。

3 结 论

使用 3 种波长的连续激光进行辐照太阳能电池的实验,实验结果表明,太阳能电池对于波段外的 1319nm 激光有输出响应,原因是组成电池的硅对 1319nm 的光有着本征吸收以外的其它吸收机制。激光功率密度较低时,连续激光不能对电池造成物理损伤,电池的性能没有下降;激光功率密度升高到一定程度之后,损伤组成电池的材料后,电池的性能发生永久下降。10.6 μm 激光和 1064nm 激光对电池的损伤结果异同主要表现在损伤形貌的差别上,主要是因组成太阳能电池的玻璃盖片和硅对两种波长光的吸收系数差距较大所造成;电池对 1319nm 激光的吸收系数很小,很难因其辐照而产生损伤。

参 考 文 献

- [1] CURTIZ D J, MEULENBERG A. Statistical analysis of one MeV electron irradiation of silicon solar cells [C]//8th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Seattle, WA, USA: IEEE, 1970:193-200.
- [2] CRABB R L. Photon induced degradation of electron and proton irradiated silicon solar cells [J]. IEEE Transation on Nuclear Science, 1973, 20(6):243-249.
- [3] CURTIN D J, STATLER R L. Review of radiation damage to silicon solar cell [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1975, 11(4):499-513.
- [4] WALTERS R J, COTAL H L, MESSENGER S R, et al. Radiation response of InP/Si and InGaP/GaAs space solar cells [J]. Solar Energy, Materials and Solar Cells, 1998, 50(1/4):305-313.

(下转第 683 页)

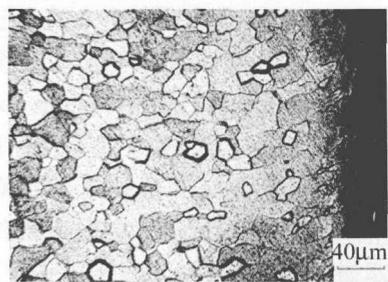


Fig. 18 Heat affected layer in specimen (200 \times)

3 结论

分析和研究了车身覆盖件进行3维激光切割时的工艺技术问题,包括切割设备的特点、网格夹具的快速设计制造方法、3维激光切割的编程技术,以及为提高切割质量、切割精度和切割效率所采取的特殊工艺措施。

(1)兼顾切割效率和质量,一般切割开始前的穿孔、上下坡及其转角的切割轨迹采用脉冲激光,切孔和切割坡度较为缓和的轨迹采用连续激光。基于3维激光切割工艺无接触力作用的特殊性,夹具只起定位作用,采用具有较高定位精度和快速制作方法的网格夹具可获得良好的切割质量。

(2)在一定范围内调整入射角大小可以在保证切割质量的同时解决切割头与工件的碰撞;当工件变形量较小时,可以通过合理布置夹紧装置加以修正,但若变形超过一定量时,需要通过反复修改调试程序来解决超程报警;对于转角处过烧的问题,通过修改法线密集程度、添加工艺点等,或采用脉冲激光、空气为辅助气体等特殊工艺来解决。空气作为辅助气体时,所需功率高,但对切割质量的影响较小。

(3)通过特殊工艺技术改进,在适宜的工艺参量条件下,车身覆盖件的切缝宽度窄(在0.28mm~0.50mm之间);切割面光滑(粗糙度数值变化范围在3.27 μm ~7.22 μm 之间,与机械加工中的半精车所能达到的表面粗糙度数值相当);热影响层宽度非常小(在40 μm 左右)。

参 考 文 献

- [1] CHEN G Y, CAO M L, HUANG F J. Application and research of three-dimensional laser cutting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007(3):38-42(in Chinese).
- [2] LAMIKIZ A, LOPEZ L N, SANCHEZ J A, *et al.* CO₂ laser cutting of advanced high strength steels[J]. *Applied Surface Science*, 2005, 242(1):362-368.
- [3] YAN C, LI L J, LI J, *et al.* Review of surface quality study on laser sheets cutting[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3):270-274(in Chinese).
- [4] DENG Q S, TANG X H, QIN Y X. Technological study on high power CO₂ laser cutting of small hole on middle-thick steel plates[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5):554-557(in Chinese).
- [5] ZHANG G S. *Modern laser manufacture technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 137-139(in Chinese).
- [6] CHEN G Y, MEI L F, ZHANG M J, *et al.* Application and research of laser processing automobile body manufacturing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009(9):17-23(in Chinese).
- [7] YU G, YU H J. *Integrated laser intelligent processing engineering* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002:5(in Chinese).
- [8] CHEN J M, BAO Y, XIAO R S, *et al.* Auto-programming system for 3-D laser processing[J]. *Laser Technology*, 2001, 25(3):217-220(in Chinese).
- [9] CHEN G Y, HUANG F J, LIU X F. Application and research of three-dimensional laser cutting technology in auto-body panel manufacturing[J]. *Laser Journal*, 2008, 29(4):67-69(in Chinese).
- [10] MA Y B, GAN Z M, SHAO X D. The developments and applications of new locating mechanism used for laser cutting vehicles stamping[J]. *Technology of Equipment Maintenance*, 2006, 28(4):26-31(in Chinese).

(上接第635页)

- [5] WAN B, TU J L, WANG L X, *et al.* Radiation effects of 3J GaInP₂/GaAs/Ge solar cells irradiated by electrons[C]//Chinese Society of Astronautics Space Energy Conference Proceedings, 2005, Shanghai. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005:120-125(in Chinese).
- [6] ZAKIR A, GUO Q, REN D Y, *et al.* Radiation characteristics of thin and textured thin Si solar cells irradiated by 1MeV electrons[J]. *Nuclear Techniques*, 2004, 27(4):277-280(in Chinese).
- [7] XIA G P, ZHENG J G, FENG L H, *et al.* Study of the preparation of CdTe solar energy cell and the effect of electron irradiation on it[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2004, 41(1):118-121(in Chinese).
- [8] XUE H Zh, LI W, ZHANG H T, *et al.* Experimental study about laser induced damage to photovoltaic detectors in vacuum[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5):494-497(in Chinese).
- [9] LONG Y H, XIONG L C, SHI T L, *et al.* The quality study on excimer laser-induced electrochemical etching of silicon[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3):235-237(in Chinese).
- [10] LIU E K, ZHU B Sh, LUO J Sh, *et al.* *Semi conductor physics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007:329-330(in Chinese).
- [11] SUN Ch W, LU Q Sh, FAN Zh X, *et al.* Effects of laser irradiation [M]. Beijing: Publishing House of National Defense Industry, 2002: 17-18(in Chinese).
- [12] ZHU Y X. The effects of silicon solar cells under the irradiation of laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003: 4-5(in Chinese).