

飞秒激光辐照对 GaAs/Ge 太阳能电池的性能退化研究

薛青¹ 吴文慧^{1*} 叶云霞¹ 刘海霞² 陈瑞芳¹ 花银群^{1,2}¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013²江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 研究了飞秒激光辐照对 GaAs/Ge 太阳能电池的损伤效应, 利用光学显微镜和非接触光学轮廓仪表征电池表面损伤形貌, 并用伏安特性测试系统表征电池辐照前后的光伏特性。分析了不同激光能量密度下, 激光烧蚀对电池表面形貌及电学性能产生的损伤程度。实验结果表明, 激光能量密度小于 0.53 J/cm^2 时, 仅损伤到减反射膜; 随激光能量密度的增加, 电池损伤深度不断增加, 当能量密度为 0.78 J/cm^2 时, 已损伤到电池发射区; 电池性能参数如短路电流、开路电压、最大功率和填充因子随激光能量密度的增加而衰减, 衰减幅度先增加后减小; 在所有测试参数中, 光电转化率的退化最为明显。飞秒激光辐照对太阳能电池具有破坏性的影响, 这直接影响到电池的光伏特性。

关键词 飞秒激光; 太阳能电池; 电流-电压曲线; 性能退化

中图分类号 O539; TN 244

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.041405

Property Degradation of GaAs/Ge Solar Cells after Femtosecond Laser Irradiation

Xue Qing¹ Wu Wenhui¹ Ye Yunxia¹ Liu Haixia² Chen Ruifang¹ Hua Yinqun^{1,2}¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China²School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract Effects of femtosecond laser irradiation on GaAs/Ge solar cells are studied. Optical microscope and non-contact optical profilometer are used to measure the surface morphology of the solar cells and the the volt-ampere characteristic test system is used to test the photovoltaic properties. The damage degree of ablation on the surface morphology and electrical properties is analysed. The results indicate that when the laser energy density is below 0.53 J/cm^2 , the damage only reaches the anti-reflection film. With the increase of laser energy density, the damage depth of the solar cell is increasing, when the laser energy density reaches 0.78 J/cm^2 , the damage gets to the emitter region. With the density increasing, the electric properties such as short circuit current, open circuit voltage, maximum power and filling factor suffer a certain degradation. The decay amplitude of the electric properties increase at first and then decrease. Among all the evaluated electric properties, maximum power degrades most remarkably. In conclusion, laser irradiation could induce a great damage in GaAs/Ge solar cells, which influences the electric properties directly.

Key words femtosecond laser; solar cell; ampere-volt curve; property degradation

OCIS codes 140.3330; 240.0310; 350.6050; 320.7090

1 引言

GaAs 太阳能电池有抗辐射、耐高温、效率高等优点, 被视为 21 世纪卫星航天器的新一代主电源^[1-4]。从 80 年代至今, GaAs 太阳能电池在空间主电源领域的应用比例日益增大, 目前已超过 90%^[5-9]。国外对 GaAs 太阳能电池的辐照损伤研究起步较早, 对高能太空电粒子辐照作用下带电粒子能量、注量效应和辐照损伤机理做了大量的研究工作^[10-12], 并且从 20 世纪 90 年代初开始研究单频高能激光辐照太阳能电池以实现超远

收稿日期: 2014-10-27; 收到修改稿日期: 2014-11-22; 网络出版日期: 2015-03-26

基金项目: 国防预研基金(9140A11040113JW29151)

作者简介: 薛青(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事激光表面处理方面的研究。E-mail: alphaqing@ujs.edu.cn

导师简介: 花银群(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: huayq@ujs.edu.cn

*通信联系人。E-mail: 1060128205@qq.com

距离能量的传输^[13-14]。当峰值功率足够大,激光以其热效应会在短时间内烧蚀电池表面,从而造成电池的损伤,所以激光辐照不仅可以用于远距离能量传输,还可以用于激光武器打击^[15-16]。

国外关于激光对太阳能电池的损伤效应研究很少公开报道,国内主要研究了激光照射对硅太阳能电池的损伤,并且激光光源大多为纳秒、皮秒脉冲激光或连续激光^[17-18]。飞秒超短脉冲激光有非常高的瞬间功率,能快速、大量地传输能量,作为激光打击武器具有较高优势。目前,尚无飞秒激光对太阳能电池特别是GaAs太阳能电池的损伤研究这方面的报道。

本文开展了飞秒激光辐照对GaAs/Ge太阳能电池的损伤效应实验研究,研究了不同能量飞秒激光辐照GaAs/Ge太阳能电池表面后,电池表面形貌损伤特征及辐照对光电效应的影响。

2 实验

2.1 实验材料

实验样品为GaAs/Ge太阳电池,未加玻璃盖片,该电池采用金属有机物化学气相沉积法(MOCVD)制备,其结构如图1所示。在窗口层上方覆盖一层厚度约为150 nm的TiO₂/SiO₂双层减反膜,用于减小光的反射。GaAs/Ge单结太阳能电池平均效率可达19%,尺寸为2 cm×3 cm,辐照环境为大气层以外的太阳光谱分布(AMO),能量密度为135.3 mW/cm²。

2.2 辐照实验

辐照实验采用相干公司生产的Legend Elite飞秒激光器,波长800 nm,脉宽130 fs,光斑直径22 μm,重复频率1000 Hz,单脉冲能量在3.5 mJ内可调,光强分布为高斯分布。飞秒激光加工系统如图2所示。

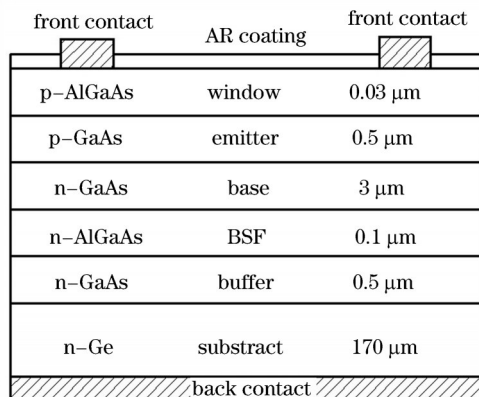


图1 GaAs/Ge太阳电池结构示意图

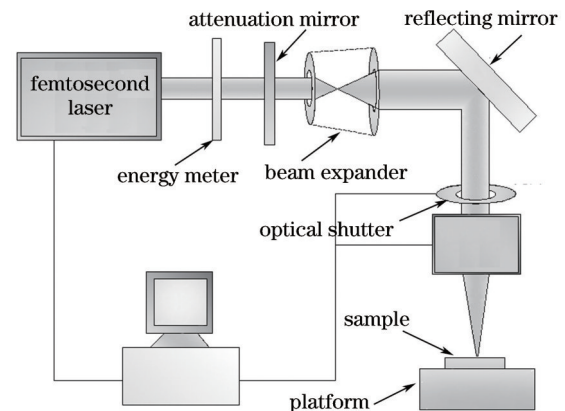


图2 飞秒激光器微加工系统

Fig.1 Structural schematic diagram of GaAs/Ge solar cells

Fig.2 Micromachining system of femtosecond laser

实验参数如下:辐照能量设为1~4.5 μJ(对应能量密度0.26~1.18 J/cm²;扫描速度为22 mm/s(对应搭接率刚好0%);飞秒激光扫描的均匀度浮动为±5%。

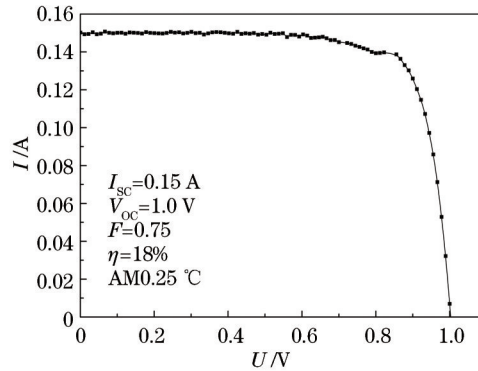
2.3 电流-电压电性能测试

用太阳模拟器模拟AM0,在室温条件下,四线制测试GaAs/Ge太阳能电池在该条件下辐照前后的电流-电压($I-V$)特性,结果如图3所示。其中测量的电性能参数包括开路电压(V_{oc}),短路电流(I_{sc}),最大输出功率(P_{max}),填充因子(FF)和转换效率(η)。并将其辐照前后的值作比较,进行归一化处理。

3 实验结果与分析

3.1 形貌表征

图4为在飞秒激光扫描速度22 mm/s下,不同能量密度激光辐照后,电池表面损伤形貌图。图4(a)为样品未受辐照的原始图。白色光亮区为表面损伤区,当激光能量密度为0.53 J/cm²时,表面损伤形貌为相互离散的圆形损伤光斑,如图4(b)所示。随着能量密度的增加,每个激光光斑产生的损伤面积逐渐增大,当激光能量密度达到0.79 J/cm²时,损伤光斑相切,如图4(c)所示。将能量密度进一步增加到1.18 J/cm²时,实际损伤面积明显大于光斑实际面积,材料表面几乎完全损伤,如图4(d)所示。测试结果表明:飞秒激光扫描速度

图3 GaAs/Ge 太阳能电池 I - V 特性曲线Fig.3 Typical I - V curve of a GaAs/Ge solar cell

一定时,能量密度增加到 1.18 J/cm^2 的过程中,电池表面的损伤面积逐渐增大。这是由于飞秒激光光束横截面内光强分布呈高斯型,在低能量密度时,只有高斯光束中心及附近的能量密度超过材料的损伤阈值,该区域才会被烧蚀破坏。而远离光束中心,激光强度较低,材料没有明显的表观损伤。随着激光能量密度增加,远离光束中心激光强度逐渐增大,甚至大于材料损伤阈值,因此光束造成的电池表面损伤面积逐渐增大。

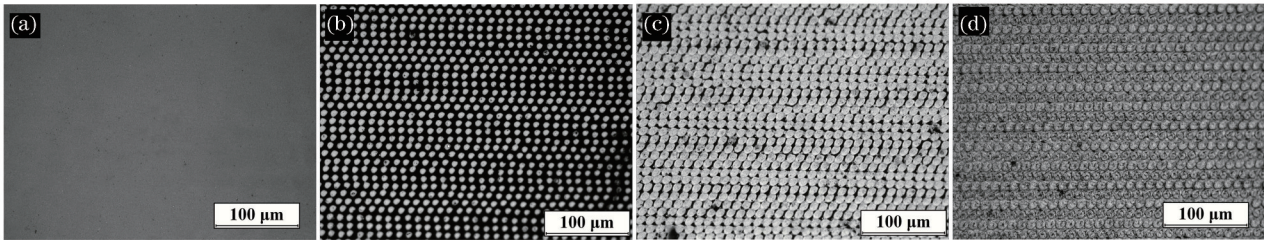
图4 不同能量密度飞秒激光照射下样品表面的变化过程。(a) 0; (b) 0.53 J/cm^2 ; (c) 0.79 J/cm^2 ; (d) 1.18 J/cm^2 Fig.4 Sample surfaces illuminated by femtosecond laser at different laser energy intensities. (a) 0; (b) 0.53 J/cm^2 ; (c) 0.79 J/cm^2 ; (d) 1.18 J/cm^2

图5为在飞秒激光扫描速度 22 mm/s 下,不同能量密度激光辐照后,电池表面的三维形貌及损伤深度图。图5(a)为激光能量密度 0.53 J/cm^2 时,电池表面的三维形貌图,其对应的损伤深度图如图5(b)所示。由图5(a)可知电池的损伤程度较小,损伤深度在 150 nm 以内[图5(b)],而电池减反射膜的厚度约为 150 nm ,由此可知激光能量密度小于 0.53 J/cm^2 时,主要损伤电池的减反射膜。随着激光能量密度的提高,损伤深度不断增加[图5(d), (f)]。当激光能量密度达到 0.79 J/cm^2 时,电池的损伤程度加剧[图5(c)],损伤深度为 225 nm [图5(d)],大于减反射膜与窗口层厚之和(约为 180 nm),表明此时激光已损伤到发射区。激光能量增加到 1.18 J/cm^2 时,电池的损伤程度最大[图5(e)],最大损伤深度约为 350 nm [图5(f)],而电池发射区的深度为 500 nm (图1),表明此时的破坏仍局限于电池的发射区。图中损伤深度有高于原始表面的峰,这是由电池经飞秒激光烧蚀后再沉积造成的。

3.2 电性能测试与分析

图6表示的是飞秒激光不同能量密度辐照后 GaAs/Ge 太阳能电池 I - V 曲线。原始样品的光电转化效率(η)为 19% , F 为 0.76 。当辐照能量密度为 0.26 J/cm^2 时,电池的 η 与 F 下降不明显(如表1所示),对应的表面形貌损伤几乎无法表征;当激光能量密度增加到 0.53 J/cm^2 时, I_{sc} 与 V_{oc} 明显下降,并且 η 降为 8.07% , F 降为 0.6941 ,电性能参数衰退的主要原因是电池的减反射膜遭到破坏[图5(a)和(b)],电池的光吸收率明显下降;激光能量密度进一步增加到 0.79 J/cm^2 时, η 降为 4.51% ,此时破坏到电池的发射区[图5(c)和(d)];激光能量密度增加到 1.18 J/cm^2 ,电池的发射区进一步遭到破坏, η 降为 3.73% ,电池几乎处于瘫痪状态。

将电学性能实验数据进行归一化处理,以描述飞秒激光辐照对电学性能参数的影响,如图7所示。由于太阳光入射功率对于每个太阳能电池样品都是相同的,所以最大功率的衰减情况与光电转换效率相同,所以不需要绘制光电转换效率的归一化曲线。

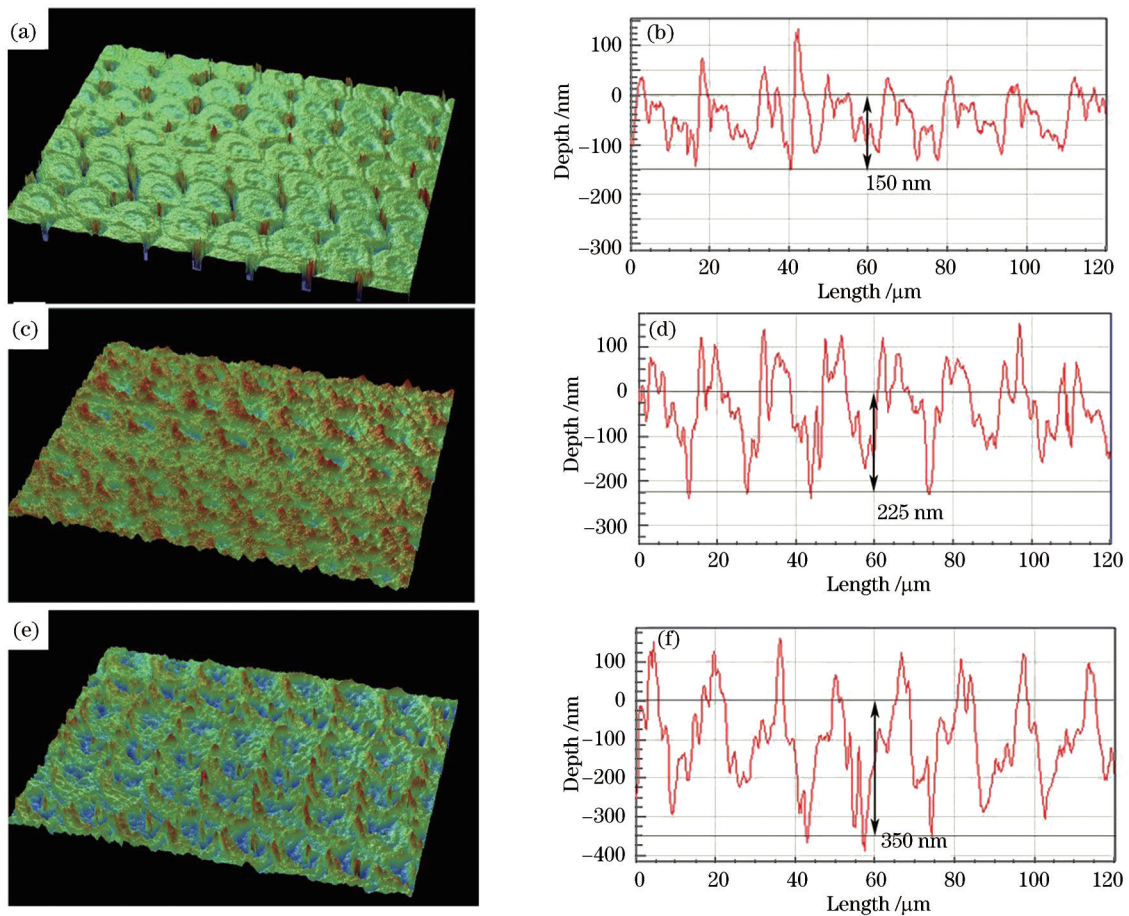


图5 不同能量密度飞秒激光照射后样品的三维形貌及损伤深度图。(a),(b) 0.53 J/cm^2 ; (c), (d) 0.79 J/cm^2 ; (e), (f) 1.18 J/cm^2
 Fig.5 Three-dimensional profile images and profilometer measurements of the samples illuminated by femtosecond laser at different laser energy density. (a), (b) 0.53 J/cm^2 ; (c), (d) 0.79 J/cm^2 ; (e), (f) 1.18 J/cm^2

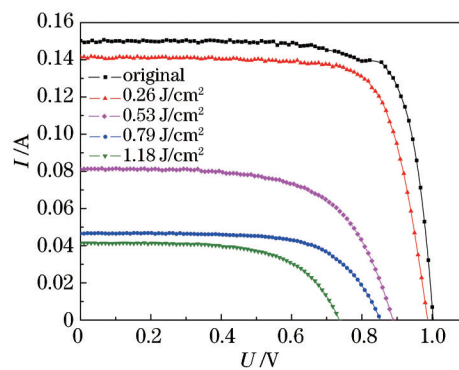


图6 不同能量密度飞秒激光辐照后 GaAs/Ge 太阳能电池 I - V 曲线

Fig.6 I - V curves of GaAs/Ge solar cells after femtosecond laser radiation at different fluences

表1 激光辐照后 GaAs/Ge 电池的电学性能参数

Table 1 Electrical properties of GaAs/Ge cells after laser irradiation

Laser energy density $/(J/cm^2)$	I_{sc} / A	V_{oc} / V	$F / \%$	P_{max} / W	$\eta / \%$
0.26	0.1415	0.9899	0.7510	0.0923	15.68
0.53	0.0843	0.8756	0.6941	0.0475	8.07
0.79	0.0466	0.8485	0.6725	0.0266	4.51
1.18	0.0424	0.7475	0.6249	0.0220	3.73

图7为不同能量密度飞秒激光辐照后,电池片的性能参数归一化曲线。当能量密度为 0.26 J/cm^2 时,电池的性能参数下降幅度并不大。当能量密度为 0.3 J/cm^2 时,电池的 P_{\max} 降为原先的75%左右, I_{sc} 下降明显, V_{oc} 、 F 几乎没有变化;当能量密度为 0.5 J/cm^2 时,电池的 P_{\max} 降为原先的50%左右;当能量密度为 0.8 J/cm^2 时,电池的 P_{\max} 降为原先的20%左右。随着能量密度的进一步增加,电池电性能的衰减幅度进一步减小。飞秒激光辐照太阳能电池后,各个参数值都有一定下降,但是各参量衰减严重程度不同,其排列依次是 $P_{\max} > I_{\text{sc}} > V_{\text{oc}} > F$ 。从图7中可以明显看到电池的 P_{\max} 衰减线的斜率先增大后减小,这表明电池性能的衰减幅度先增加后减小。

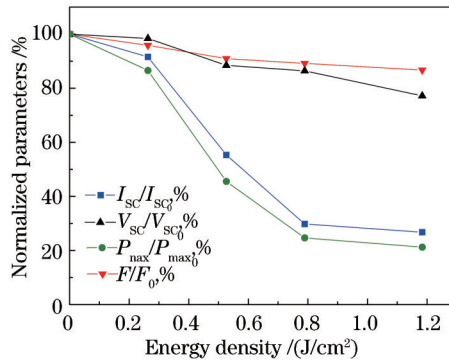


图7 GaAs/Ge 太阳能电池飞秒激光辐照后电性能参数变化归一化曲线

Fig.7 Normalized parameters curves of GaAs/Ge solar cells performance after femtosecond laser radiation at different laser energy densities

3.3 机理分析

激光辐照 GaAs 太阳能电池时,表层减反射膜最先受到破坏,当激光能量密度在 $0.26 \sim 0.53 \text{ J/cm}^2$ 之间时,主要损伤电池的减反射膜。减反射膜遭到破坏直接导致材料反射率增加。由(1)式得,电池的总短路电流密度降低直接导致电池的电学性能衰退。

电池的总短路电流密度:

$$J_{\text{sc}} = \sum_{\lambda} J_{\text{sc}}(\lambda) = \sum_i qQ(\lambda_i)[1 - R(\lambda_i)]S_r(\lambda_i), \quad (1)$$

式中 J_{sc} 为总短路电流密度, $F(\lambda)$ 为每平方厘米入射光子数, R 为材料反射率, S_r 为光谱响应。

太阳能电池是将 p/n 结区产生的电流送给负载,这之间要经过电池体、金属电极、外部导线等,这些部分本身的电阻及电极与表面接触电阻构成了串联电阻(R_s),此外电池边缘清洁及内部缺陷会产生旁路漏电流,相当于在电池内部并联了电阻,即为并联电阻(R_{sh})。

根据以上分析,可得如图8所示的太阳能电池等效电路,对应的工程上广泛采用的太阳能数学模型如(2)式所示^[19]。

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{\text{sh}}}, \quad (2)$$

式中 I 、 V 分别是负载上的电流、电压, I_L 为光生电流, I_0 为反向饱和暗电流, n 为PN结品质因子,理想状态为1, V_T 为热电压,等于 KT/q , K 为玻尔兹曼常数 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, q 为太阳电池电子荷量 $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, T 为绝对温度,单位开尔文(K)。

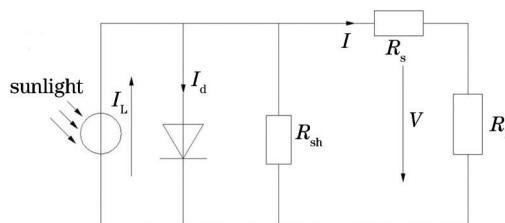


图8 太阳能电池等效电路

Fig.8 Equal electric circuit of solar cell

由于太阳能电池的 $I-V$ 特性为超越方程,不能求出实测数据与串并联电阻直接的解析关系,只能由实测的 $I-V$ 曲线来近似测量串并联电阻。理论上,可以从 $I-V$ 曲线在开路电压处的斜率求出 R_s 近似值,从 $I-V$ 曲线在短路处的斜率求出 R_{sh} 近似值。经计算,激光能量密度从 0.53 J/cm^2 增加到 0.79 J/cm^2 时,电池的 R_s 从 1.6337Ω 增加到 2.2296Ω , R_{sh} 从 459.2Ω 下降到 337.1Ω 。因为有了 0.5959Ω 的串联电阻增量和 122.1Ω 的并联电阻减量,电池效率从 8.07% 降低到 4.51% 。激光能量密度增加到 1.18 J/cm^2 时,电池的 R_s 增加到 2.7197Ω , R_{sh} 减小到 126.5Ω ,此时电池效率降低为 3.73% 。当激光能量密度大于 0.53 J/cm^2 时,烧蚀区域损伤到电池的窗口层;增加到 0.79 J/cm^2 时已损伤到发射区。以上分析这说明激光能量密度大于 0.53 J/cm^2 时已损伤到电池的 p/n 结,同时对栅状电极产生不同程度的损伤,这使得光生电子从 p/n 结区收集到 N 极的过程中损耗增加,造成 R_s 增大。烧蚀熔坑、烧蚀沉积物和导电旁路造成漏电流的产生,导致 R_{sh} 降低。 R_s 增加导致电池短路电流减小, R_{sh} 减小导致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^[17]。

4 结 论

对 GaAs/Ge 太阳能电池进行飞秒激光辐照实验,通过改变飞秒激光的辐照参数,研究太阳能电池的退化规律,可以得出以下一些结论:

1) 飞秒激光辐照能使 GaAs/Ge 太阳能电池性能出现明显衰退,衰退的幅度与飞秒激光辐照能量密度明显相关;

2) 飞秒激光辐照时, GaAs/Ge 太阳能电池的损伤深度随激光能量密度的增加不断增加;激光能量密度小于 0.53 J/cm^2 时,仅损伤到减反射膜;当能量密度为 0.79 J/cm^2 时,损伤到电池发射区;

3) 飞秒激光辐照时, GaAs/Ge 太阳能电池电性能的衰退,随辐照能量的增大而增大。电性能参数的衰减程度排序为 $P_{\max} > I_{sc} > V_{oc} > F$;

4) 随着飞秒激光辐照能量的增加,电性能的衰减幅度先增大后减小,当能量密度为 0.53 J/cm^2 ,光电转化率降为原先的 50% 左右,能量密度为 0.79 J/cm^2 时,光电转化率降为原先的 20% 左右。

参 考 文 献

- 1 Zhang Xinhui. Study on anti-electron radiation of GaAs/Ge solar cells [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2004, 28(1): 17-21.
张新辉. GaAs/Ge 太阳能电池抗电子辐射研究[J]. 电源技术, 2004, 28(1): 17-21.
- 2 Zou Yonggang, Li Lin, Liu Guojun, et al.. Research progress of GaAs solar cell [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2010, 33(1): 44-47.
邹永刚, 李 林, 刘国军, 等. GaAs 太阳能电池的研究进展[J]. 长春理工大学学报, 2010, 33(1): 44-47.
- 3 X B Xiang. The study on high efficient GaAs/Ge solar cells [J]. Solar Energy Material and Solar Cells, 2001, 68(1): 97-103.
- 4 S Scholz, J Baner, G Leibiger, et al.. MOVPEP growth of GaAs on Ge substrates by inserting a thin low temperature buffer layer [J]. Cryst Research & Technology, 2006, 41(2): 111-116.
- 5 Zhang Zhongwei, Lu Jianfeng, Chi Weiyang, et al.. Technique development and prospects analysis of GaAs solar cell [J]. Aerospace Shanghai, 2003, 20(3): 33-38.
张忠卫, 陆剑峰, 池卫英, 等. 砷化镓太阳能电池技术的进展与前景[J]. 上海航天, 2003, 20(3): 33-38.
- 6 Zhang Zhongwei, Fu Xinfen. Progress of foreign solar cell technology [J]. Aerospace Shanghai, 1999, (6): 29-34.
张忠卫, 符杏芬. 国外太阳能电池技术的进展[J]. 上海航天, 1991, (6): 29-34.
- 7 Fang Zujie, Chen Gaoting, Ye Qing. Progress of photovoltaic electric power generation [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 5-14.
方祖捷, 陈高庭, 叶 青. 太阳能发电技术的研究进展[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 5-14.
- 8 He Weiyu. Technology development situation of GaAs series solar cells for space application [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2004, 22(2): 59-64.
何炜瑜. GaAs 系列太阳能电池技术与发展[J]. 中国民航学院学报, 2004, 22(2): 59-64.
- 9 Ouyang Ting, Liu Pengyi, Le Song. GaAs solar cell [C]. Guangdong Province Vacuum Society Symposium, 2013: 27-34.
欧阳婷, 刘彭义, 乐 松. GaAs 太阳能电池[C]. 2013年广东省真空学会学术年会论文集, 2013: 27-34.

- 10 B E Anspaugh. GaAs Solar Cell Radiation Handbook [M]. Pasadena: JPL Publication Press, 1996: 1-2.
- 11 C K Ronald, Y L Robert, G S Kamath. High-efficiency GaAs solar cells [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1984, 31(5): 577-588.
- 12 J C Bourgoin, N D Angelis. Radiation-induced defects in solar cell materials [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2001, 66(1-4): 467-477.
- 13 R K Jain, A Lanis. Transient response of gallium arsenic and silicon solar cells under laser pulse [C]. IEEE First WCPEC, 1994: 1874-1877.
- 14 R A Lowe, G A Landis, P Jenkins. Response of photovoltaic cells to pulsed laser illumination [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1995, 42(4): 744-751.
- 15 Cui Yun, He Hongbo, Fan Zhengxiu, *et al.*. Development of high energy laser weapon and research of laser protective coatings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(6): 10-13.
崔云, 贺洪波, 范正修, 等. 高能激光武器的发展及卫星激光防护膜的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(6): 10-13.
- 16 Zong Siguang, Wu Ronghua, Cao Jing, *et al.*. Developments and trends of high energy laser weapons [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 43(8): 080016.
宗思光, 吴荣华, 曹静, 等. 高能激光武器技术与应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 43(8): 080016.
- 17 Qiu Dongdong, Wang Rui, Cheng Xiang'ai, *et al.*. Mechanisms research on continuous wave laser induced damage to solar cells [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302006.
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.
- 18 Qiu Dongdong, Jin Huasong, Liu Siliang, *et al.*. Damage contrast of solar cells induced by short-pulse laser and CW laser [J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(2): 112-116.
邱冬冬, 金华松, 刘斯亮, 等. 短脉冲和连续激光对太阳能电池的损伤对比[J]. 光电子技术, 2011, 31(2): 112-116.
- 19 Wang Zhimin. The Key Technique Research of On-Line Solar Cell Test System [D]. Shanghai: Shanghai University, 2009.
王志明. 在线太阳能电池测试系统关键技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2009.

栏目编辑: 张浩佳