

皮秒脉冲激光辐照太阳能电池损伤特性实验研究 (特邀)

周伟静, 文 明, 常 浩*, 陈一夫, 姬 刚, 马英杰, 简智龙, 廖雨杰

(航天工程大学 宇航科学与技术系 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 以皮秒脉宽激光多脉冲损伤太阳能电池为背景, 通过激光烧蚀电池前后表面形貌、电池伏安特性、电致发光特性获得损伤特性。采用脉宽 15 ps、波长 1 064 nm 皮秒脉冲激光辐照三结 GaAs 太阳能电池进行实验。通过重频调节改变激光辐照功率, 对太阳能电池栅线与非栅线部位在激光辐照下的损伤特性进行分析。实验发现辐照非栅线部位时, 尽管激光光斑较小, 但电池内部材料已经发生损伤, 主要是由于电池内部材料有序结构的破坏逐渐增大, 尤其是激光功率越高时, 内部损伤面积越大。当激光辐照栅线部位时, 栅线部位受热熔断会极大影响太阳能电池对载流子的吸收, 从而降低电池的光电转换能力, 进而影响太阳能电池的电性能, 使得激光辐照栅线部位损伤效果强于辐照非栅线部位。

关键词: 激光辐照; 皮秒脉冲激光; 太阳能电池; 伏安特性; 表面损伤形貌; 电致发光图像
中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210870

Damage characteristics of solar cells irradiated by picosecond pulsed lasers (*invited*)

Zhou Weijing, Wen Ming, Chang Hao*, Chen Yifu, Ji Gang, Ma Yingjie, Jian Zhilong, Liao Yujie

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Its Application, Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: Based on the background that picosecond pulse width laser with multi-pulses damaging the solar cells, we use three methods that are the surface morphology, voltammetry characteristics and electroluminescence of solar cells to obtain the damage characteristics of solar cells with the laser before and after laser ablation. A three-junction GaAs solar cell with pulse width of 15 ps and wavelength of 1 064 nm is irradiated by picosecond pulsed laser. By changing the laser irradiation power through repetition frequency regulation, the damage characteristics of grid line and non-grid line of solar cell under laser irradiation are analyzed. The experimental results show that, although the laser spot is small, the material inside the battery has been damaged. It's mainly because the damage of the ordered structure of the material inside the battery is gradually increased. When the laser power is higher, the internal damage area is larger. When the gate line is irradiated by laser, the fusion of the gate line will greatly affect the absorption of the carriers by the solar cell, thus reducing the photoelectric conversion ability of the solar cell, and then affecting the electrical performance of the solar cell, so that the damage effect of the gate line is stronger than that of the non-gate line.

Key words: laser irradiation; picosecond pulsed laser; solar cell; voltage-current characteristic; surface morphology damage; electroluminescent image

收稿日期:2022-10-13; 修订日期:2022-12-14

基金项目:国家自然科学基金(11602304, 11502301)

作者简介:周伟静,女,副研究员,博士,主要从事激光航天应用技术方面的研究。

通讯作者:常浩,男,助理研究员,博士,主要从事激光航天应用技术方面的研究。

0 引言

空间太阳能电池已成为航天器电力的主要来源^[1-2], 砷化镓电池具有较高的光电转化效率^[3-4], 与硅电池相比, 在抗辐射、耐高温方面具有突出的优势, 特别是目前广泛使用的三结砷化镓 (GaInP₂/GaAs/Ge) 太阳能电池光电转换效率已经达到了 30% 以上, 是航天器太阳能帆板的主要材料^[5]。

激光作为一种高亮度光源, 在空间中可用于激光输能、激光损伤等, 因此搞清楚激光辐照太阳能电池时产生的辐照效应及其相关机理特性是十分必要的。国内外学者研究指出, 激光辐照太阳能电池损伤主要是热熔损伤以及高温导致电池有序掺杂结构破坏所致。Hiroshi Iwata 等^[6] 等使用纳秒脉宽激光研究对 GaAs 电池的损伤, 为了表征损伤程度, 利用一束探测光辐照电池表面, 通常在镜反角度测量反射强度。Li G 等^[7] 开展了连续激光辐照 GaAs 太阳能电池损伤特性的研究, 发现激光辐照带来的损伤引起了电池最大输出功率的降低, 最大输出功率降低为辐照前的 87.4%。X. Wang^[8] 开展了波长 1064 nm, 脉宽为 1 ms、10 ns、10 ps 三种脉宽激光对 Si 材料损伤的研究, 与 Hiroshi Iwata 等人使用的方法一致, 利用探测光在镜反角度的光强反映电池损伤情况, 得到脉宽为 1 ms 情况下激光损伤阈值为 127.2 J/cm², 脉宽为 10 ns 时激光损伤阈值为 4.8 J/cm², 脉冲宽度为 10 ps 激光损伤阈值为 0.7 J/cm²。结果表明, 随着激光脉冲宽度的增加, 激光对 Si 材料的损伤阈值明显增加。唐道远等人^[9] 使用波长 1315 nm 的连续激光器, 在真空环境下开展了激光辐照三结砷化镓太阳能电池的损伤研究, 实验主要对激光辐照下电池实时温度变化、电池伏安特性变化、电池形貌变化开展了测量。实验中激光功率密度为 2、5、8 W/cm², 辐照时间 60 s, 发现激光功率密度越大, 电池峰值温度越高, 激光结束辐照后电池温度立即产生下降。李永富等^[10] 采用波长为 532 nm 的连续激光和 1064 nm 的脉冲激光对 GaAs 材料进行辐照, 通过实验获得了激光功率密度和材料损伤阈值与辐照时间的关系。祁海峰等^[11] 研究了 532 nm 的连续激光和 1064 nm 的脉冲激光对 GaAs 材料的损伤过程和损伤阈值, 分析了脉冲和连续激光的损伤特性。邱冬冬等^[12-13] 采用了脉冲和连续激光对 Si 电池进行辐照, 实验中脉冲激光波长为

532 nm, 脉宽分别为 20 ns、10.8 ps 和 300 ps; 连续激光波长分别为 1064 nm、1319 nm 和 10.6 μm, 实验中通过激光辐照电池产生的表面形貌变化, 电池辐照前后的 *I-V* 特性以及电池光电转换效率的变化, 探究激光辐照太阳能电池的损伤机理。田秀芹等^[14-15] 开展了波长为 800 nm 的飞秒脉冲激光和连续激光对 Si 和 GaAs 太阳能电池的辐照损伤实验, 发现飞秒脉冲激光对电池的损伤效果弱于连续激光。

文中以三结 GaInP₂/GaAs/Ge 太阳能为研究对象, 开展皮秒超短脉冲激光对太阳能电池的损伤特性研究, 通过电池激光烧蚀前后表面形貌变化获得直接损伤效果, 通过电池伏安特性变化获得烧蚀前后的电性能变化特性, 通过电致发光获得电池烧蚀前后材料内部的损伤情况。通过实验发现电池损伤规律及特性, 并比较激光辐照电池栅线与非栅线之间的损伤异同, 该文相比较于以往研究的不同之处在于, 通过实验探究了真空条件下皮秒激光以一定重频辐照三结砷化镓太阳能电池栅线与非栅线部位导致的损伤特性及差异, 从获得的清晰损伤图像以及电致发光图像两个方面对比了激光辐照后的电池内部损伤特性, 在此基础上, 结合电池伏安特性, 分析损伤机理, 该文研究结论对空间太阳能电池的防护具有指导意义。

1 实验设计

为研究皮秒脉冲激光对光电电池的损伤, 实验中使用的主要仪器为皮秒脉冲激光器、真空舱、光学系统以及辅助测量装置等, 具体如图 1 所示。皮秒脉冲激光器作为辐照光源, 其波长为 1064 nm, 脉宽 15 ps, 单脉冲激光能量 150 μJ, 重复频率 0~200 kHz; 通过改变重复频率可实现激光平均功率的变化。真空舱内放置实验烧蚀光电电池样片, 真空舱内的环境压力保持在 10⁻³ Pa。光学系统主要包括光学窗口、光学镜等, 将激光辐照光源指向光电电池辐照区域, 实验中研究小光斑下的激光损伤特性, 因此, 聚焦光斑尺寸保持在 ~100 μm。

实验中利用光学显微镜对烧蚀前后电池形貌进行观测, 通过其表面形貌的变化获得直接损伤效果; 利用数字源表对烧蚀前后电池的伏安特性进行测量, 通过其伏安特性的变化获得烧蚀前后电性能的变化; 利用电致发光相机对烧蚀前后电池内部材料的发光

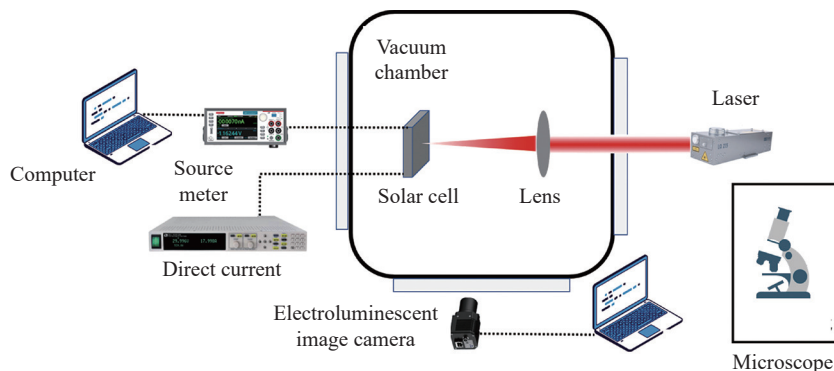


图 1 实验系统构建

Fig.1 Construction of the experiment system

情况进行测量, 电池内部的半导体材料在受到损伤时会降低发光强度甚至丧失其发光功能, 因此观察电致发光图像^[16-17]可判断激光辐照前后的内部破坏情况。

图 2 所示为实验中使用的三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池。单片电池面积为 1 cm², 从图中可以看到电池表面存在金属栅线条状电极, 电极的主要作用是对由半导体材料产生的光生载流子进行收集, 从而在电池正负极间形成电流循环通道, 如图 3 所示, 太阳能电池的表面分布有多条金属栅线电极, 太阳能电池在光照下会源源不断地产生光生载流子, 为了将光生载流子利用起来形成循环电流, 需要在太阳能电池的正负极通过栅线电极收集载流子, 从而在正负电极间形成电流循环通道。由于太阳能电池需要受到光照才能产生光生载流子, 所以在设计表面电极时会将电极设计为栅线状, 一方面能够收集载流子导通正负电极, 另一方面是留有未覆盖区域方便太阳能电池吸收光照能量。电池的其余部分为抗反射膜、GaInP₂ 层顶电池、GaAs 层中电池、Ge 层底电池等。

由于电极栅线对太阳能电池具有重要的作用, 因此在实验中有必要考虑电极栅线与非栅线部位之间的影响^[18], 为实现激光损伤, 焦点位于上述两个部位, 实验中采用一束可见光作为探测光路, 该光束与烧蚀光同轴, 从而实现烧蚀光的精确控制。

实验中, 首先将光电电池样片置于真空舱内, 并使真空舱内的环境压力达到设定数值; 其次, 将皮秒激光器发出的光束通过光学系统指向光电电池样片, 通过设定不同的重复频率, 获得损伤后的电池样片; 最后将电池样片从舱内取出, 使用光学显微镜、数字源表、电致发光相机测量损伤后的电池形貌及光电特性。

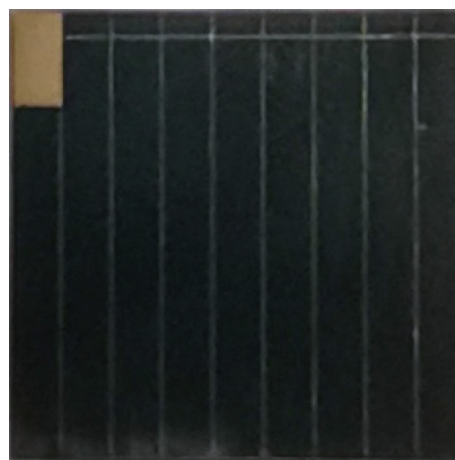


图 2 典型三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池样品

Fig.2 Typical three-junction GaInP₂/GaAs/Ge battery sample

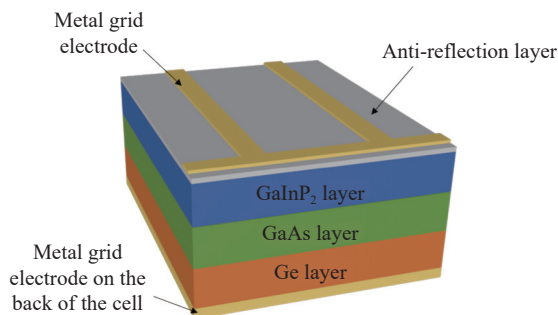


图 3 太阳能电池表面金属栅线电极分布

Fig.3 Distribution of metal grid electrodes on the surface of solar cell

2 实验结果

2.1 太阳能电池非栅线部位的激光辐照损伤

激光对光电电池的损伤评判标准一般可以从两个方面来衡量, 一是从电池表面形貌损伤情况来判断; 另一种是根据电池在损伤后的电性能输出情况进

行判断。从实际应用来说,当激光能量较低时,电池表面形貌损伤不明显,但其实由于激光热沉积影响已经破坏半导体材料的内部有序结构导致损伤发生^[12],因此电池电性能输出更具直观性。文中实验首先测量得到电池在激光辐照后的电性能输出变化情况,获得直接测量结果,其次利用光学显微镜分析表面损伤形貌,最后利用电致发光相机分析电池内部的损伤情况。

实验中保持激光脉宽、波长、单脉冲能量不变,通过改变激光重复频率,从而得到不同的输出光功率。图 4 为不同激光功率辐照下电池的伏安特性曲线,可以看出,电池的开路电压(电流为零)随着激光功率的升高而略微下降,由三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池的等效电路可知,并联电阻减小引起开路电压下降,并联电阻减小是因为激光脉冲的积累使材料发生宏观损伤,引起电池缺陷增加,降低并联电阻,但由于激光光斑较小,因此损伤区域范围有限,导致开路电压降低幅度不大。短路电流(电压为零)随着激光能量密度的增加无显著变化规律,主要是因为短路电流受串联电阻和禁带宽度两方面影响,一方面,激光损伤范围内的串联电阻(薄层电阻)增大,电流减小;另一方面,由于激光辐照加热,使得半导体材料膨胀或使晶格之间平均距离增大,从而导致电子能带结构以及能带宽度发生变化,导致带隙随温度升高而减小,即禁带宽度变窄,引起电流升高,两种因素的综合影响导致短路电流无显著变化规律。

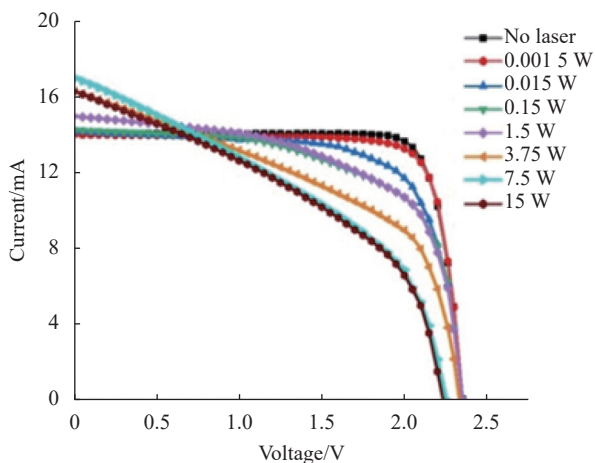


图 4 三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池非栅线部位在皮秒激光辐照下的伏安特性变化

Fig.4 Changes of *I-V* characteristics of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge battery at non-grid line under picosecond laser irradiation

图 5 为不同激光功率辐照下电池的功率电压变化情况,电池的功率电压变化值可通过图 4 的伏安特性直接计算得到,随着激光功率的增加,最大功率点开始逐渐下降。主要是由于皮秒脉冲激光单脉冲能量较低,因此很难造成电池材料的损伤,需要依靠脉冲的积累使材料发生宏观损伤。可以看出,激光功率越高,累积的脉冲数越多,最大功率下降越明显,损伤造成的影响越大。

图 6 为不同功率激光辐照太阳能电池后电池的最大功率变化情况,可以发现尽管辐照非栅线部位会

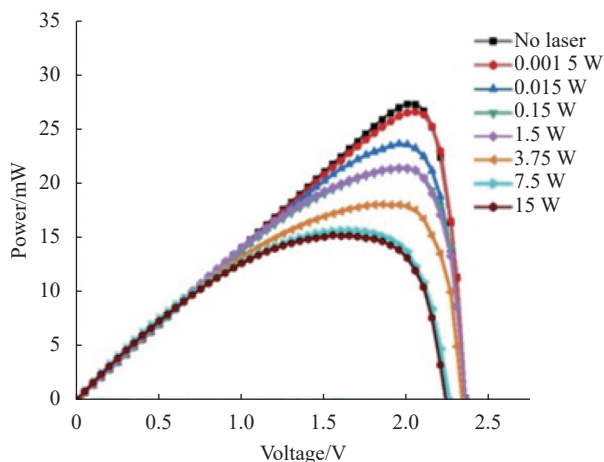


图 5 三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池非栅线部位在皮秒激光辐照下最大电输出功率随电压变化特性

Fig.5 Characteristics of maximum electrical output power of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge battery vs voltage at the non-grid line under picosecond laser irradiation

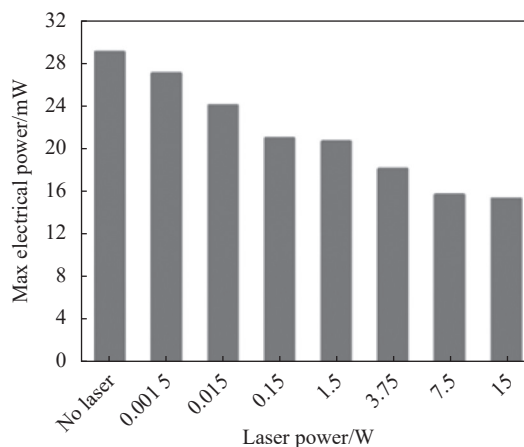


图 6 三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池非栅线部位在皮秒激光辐照下最大电输出功率随激光功率变化特性

Fig.6 Characteristics of maximum electrical output power of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge battery vs laser power at non-grid line under picosecond laser irradiation

导致三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池的电性能下降,但即使激光功率达到最高时,经过激光辐照后太阳能电池的最大输出功率仍然达到未辐照前的 52%。

图 7 为不同激光功率密度(激光功率)辐照后电池的表面形貌变化,当高重复频率脉冲激光辐照电池时,太阳能电池的损伤程度随着激光功率的增加逐渐增强,光束中心辐照区域形成一个逐渐增大的烧蚀坑。由于激光脉宽为皮秒量级,因此形成的烧蚀坑轮廓清晰。高重频皮秒脉冲激光作用下,由于脉冲时间间隔极短,皮秒脉宽小于能量弛豫时间,导致热量来不及扩散,大量热累积使辐照区域发生熔融喷溅。烧蚀坑圆形周围区域在热作用下产生材料分解,形成类似于圆环状的致密氧化层,图中亮色区域即为上述原因导致的热影响区。在实验中,当激光功率大于 0.015 W (1.91 W/mm²) 时,出现热影响区,随着功率的增高,热影响区域增大。

廓清晰。高重频皮秒脉冲激光作用下,由于脉冲时间间隔极短,皮秒脉宽小于能量弛豫时间,导致热量来不及扩散,大量热累积使辐照区域发生熔融喷溅。烧蚀坑圆形周围区域在热作用下产生材料分解,形成类似于圆环状的致密氧化层,图中亮色区域即为上述原因导致的热影响区。在实验中,当激光功率大于 0.015 W (1.91 W/mm²) 时,出现热影响区,随着功率的增高,热影响区域增大。

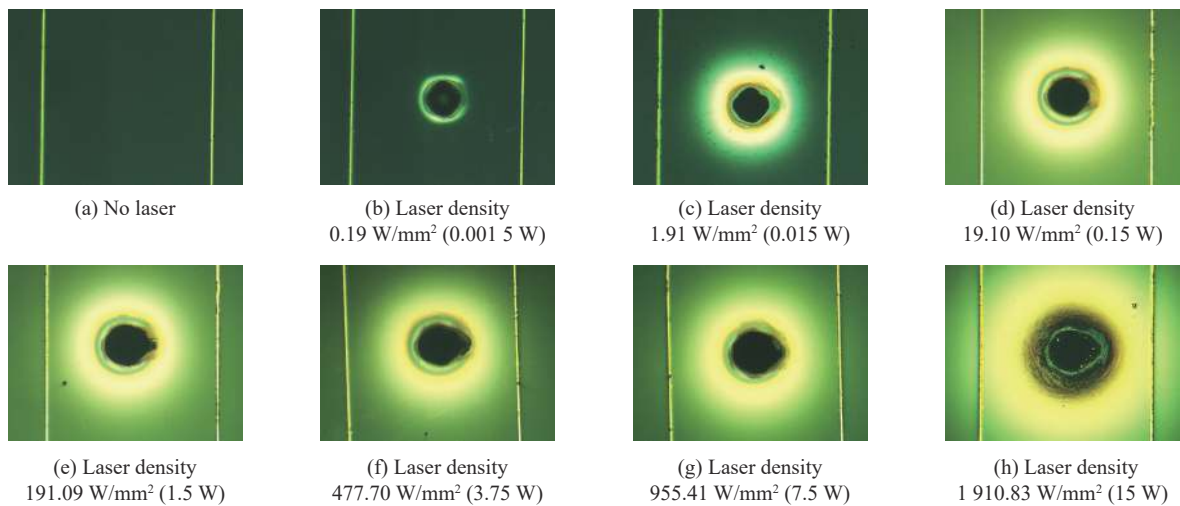


图 7 三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池非栅线部位在皮秒激光辐照下的表面损伤形貌变化

Fig.7 Changes of surface damage morphology of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge cell at non-grid line under picosecond laser irradiation

图 8 为三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池在不同激光功率密度辐照下的电致发光图像灰度变化特性,可以看出,随着激光功率密度的增大,太阳能电池失去电致发光能力的区域面积越来越大,当激光功率为 7.5 W (955.41 W/mm²) 时,电池已基本无发光出现。实验结果表明,尽管激光烧蚀光斑较小,但整块电池已基本损伤,电池内部材料已丧失光电效应。

降,激光功率达到 15 W (1910.83 W/mm²) 时,最大输出功率下降为未辐照电池的一半,从损伤形貌来看,表面已出现明显的烧蚀坑,且电致发光表面辐照光斑区域内的半导体材料已基本失去发光能力,但由于辐照光斑以外的区域并未受到损伤,因此,电池整体最大输出功率下降并不显著。

根据得到的激光辐照太阳能电池电致发光图片,得到总的相对发光强度随激光功率的变化情况,具体如图 9 所示,图中激光功率对应的功率密度可参见上文。可以发现,电池的相对发光强度随着激光功率的升高而下降,与电池最大功率下降趋势接近,因此,电致发光相对强度变化可以反映电池损伤后的最大输出功率变化。

使用皮秒多脉冲激光辐照光电电池时,由于单个皮秒脉冲的激光能量较低,且皮秒脉宽小于载流子系统与晶格的能量弛豫时间,导致热扩散作用不显著,而在多脉冲辐照模式下,脉冲之间的间隔较短,多个脉冲累积的能量最终在底部 Ge 电池处大量沉积,使太阳能电池产生热损伤。具体表现为:电池不同层之间有序掺杂结构在热作用下被破坏,降低电池性能;顶层 GaInP₂ 电池的 n+-p/p--p+结构和底层 Ge 电池的减薄型 GaAs-Ge 异质界面扩散结构对温度较为敏感^[9],在高温下发生烧蚀损伤,使电池并联电阻减小,串联电阻增大,因而电池电性能产生下降。

根据测量得到的实验结果发现,当激光功率超过 0.15 W (19.10 W/mm²) 时,电池的电性能输出有所下降,随着激光功率的增加,电池最大输出功率逐渐下

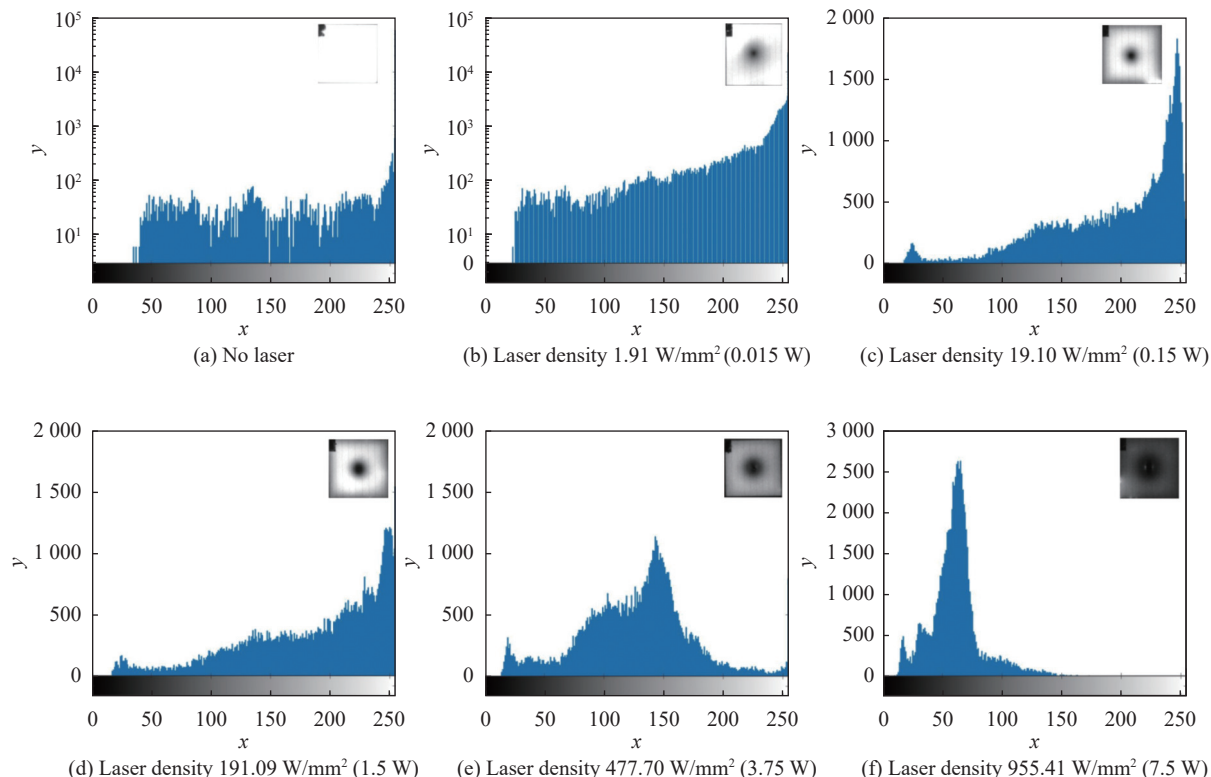


图 8 皮秒脉冲激光辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池非栅线部位的电致发光特性变化

Fig.8 Changes of electroluminescence characteristics at the non-grid parts of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge cells irradiated by picosecond laser

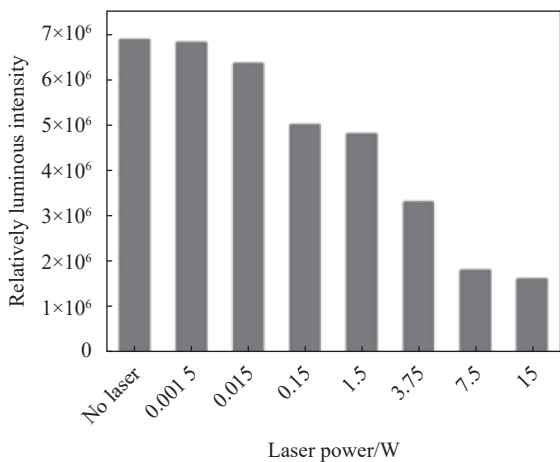


图 9 皮秒激光辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池非栅线部位相对发光强度变化

Fig.9 Changes of relatively luminous intensity at non-grid line of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge cell irradiated by picosecond laser

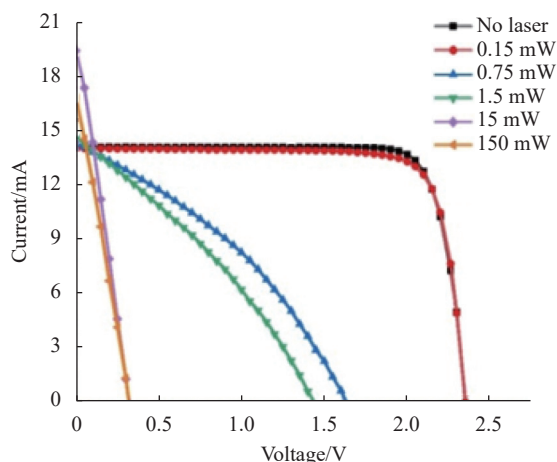


图 10 皮秒脉冲激光辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线部位的伏安特性变化

Fig.10 Changes of *I-V* characteristics of gate line of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge battery irradiated by picosecond laser

2.2 太阳能电池栅线电极部位激光辐照损伤

图 10 为皮秒脉冲宽多脉冲激光辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线后的伏安特性, 图 11 为辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线后的最大输出功率随激光功率的变化。可以看出, 当激光功率仅为 0.75 mW

时, 辐照栅线部位便会导致曲线大幅度衰减; 激光功率越高, 曲线下降趋势越显著。

图 12 为不同激光功率辐照太阳能电池栅线后的最大功率变化图, 最大输出功率随着激光功率的升高而减小, 当激光功率为 0.15 mW 时, 电池最大输出功率

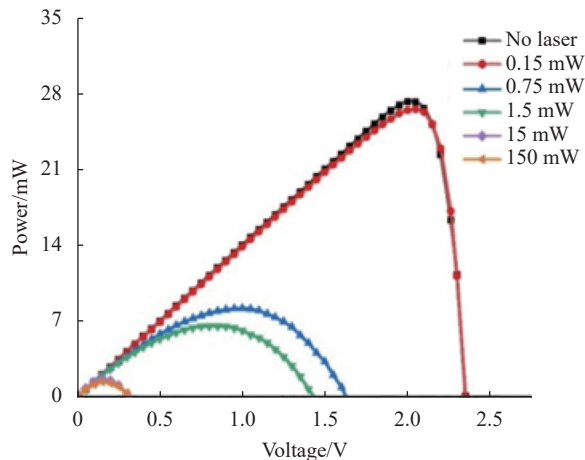


图 11 皮秒脉冲激光辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线部位最大输出功率随电压的变化特性

Fig.11 Characteristics of maximum output power at grid line of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge battery vs voltage irradiated by picosecond pulse laser

率基本不变,说明此时栅线还未失去导电能力;当激光功率为 1.5 mW 时,栅线已出现损伤,表现为此时的最大输出功率急剧下降,仅为未辐照时的 24.1%;激光功率为 15 mW 时,辐照过后电池的输出功率基本丧失,仅为未辐照时的 5.9%,电池基本完全损伤。

图 13 为栅线电极部位在不同激光功率密度辐照后的变化,实验中保持皮秒单脉冲能量不变,通过改变频率,分析不同激光功率的影响。当激光功率为

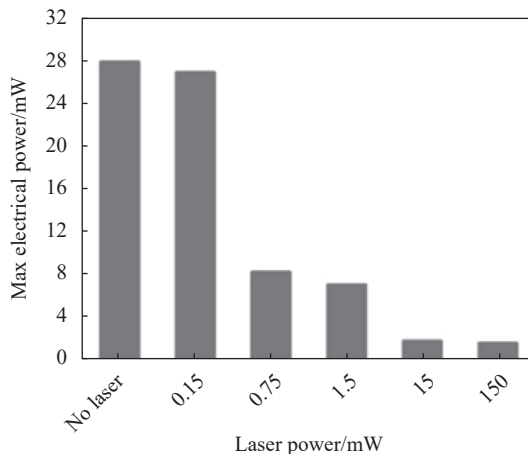


图 12 三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线部位在皮秒激光辐照下的最大输出电功率变化

Fig.12 Changes of maximum output electric power at grid line of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge battery irradiated by picosecond laser

0.15 mW (0.02 W/mm²) 时,电池表面仅产生了轻微的损伤,损伤范围较小。随着激光功率的升高,多脉冲激光辐照产生的热累积导致的烧蚀影响范围逐渐增大,电池表面的烧蚀坑越来越大,同时热影响区也逐渐增大,直至电池栅线发生熔断。

三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线电极部位的电致发光特性如图 14 所示,栅线对于激光辐照极为敏感,在电致发光中表现为一旦栅线产生损伤至完全熔断,三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池的电致发光能力将大幅度

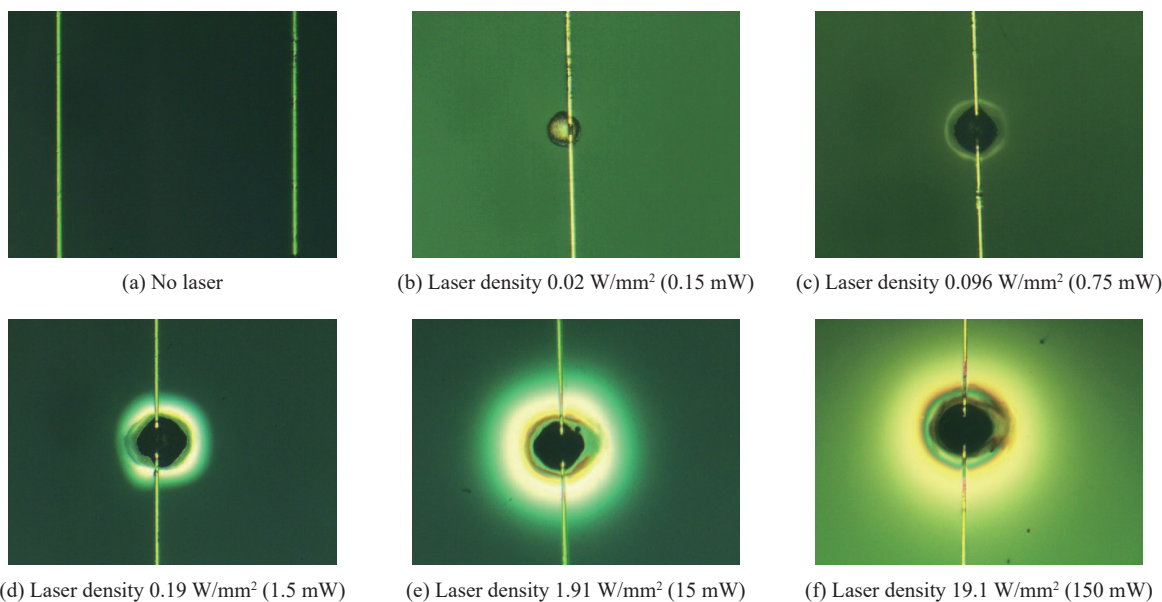


图 13 皮秒激光辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线形貌变化

Fig.13 Changes of grid lines of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge cells irradiated by picosecond laser

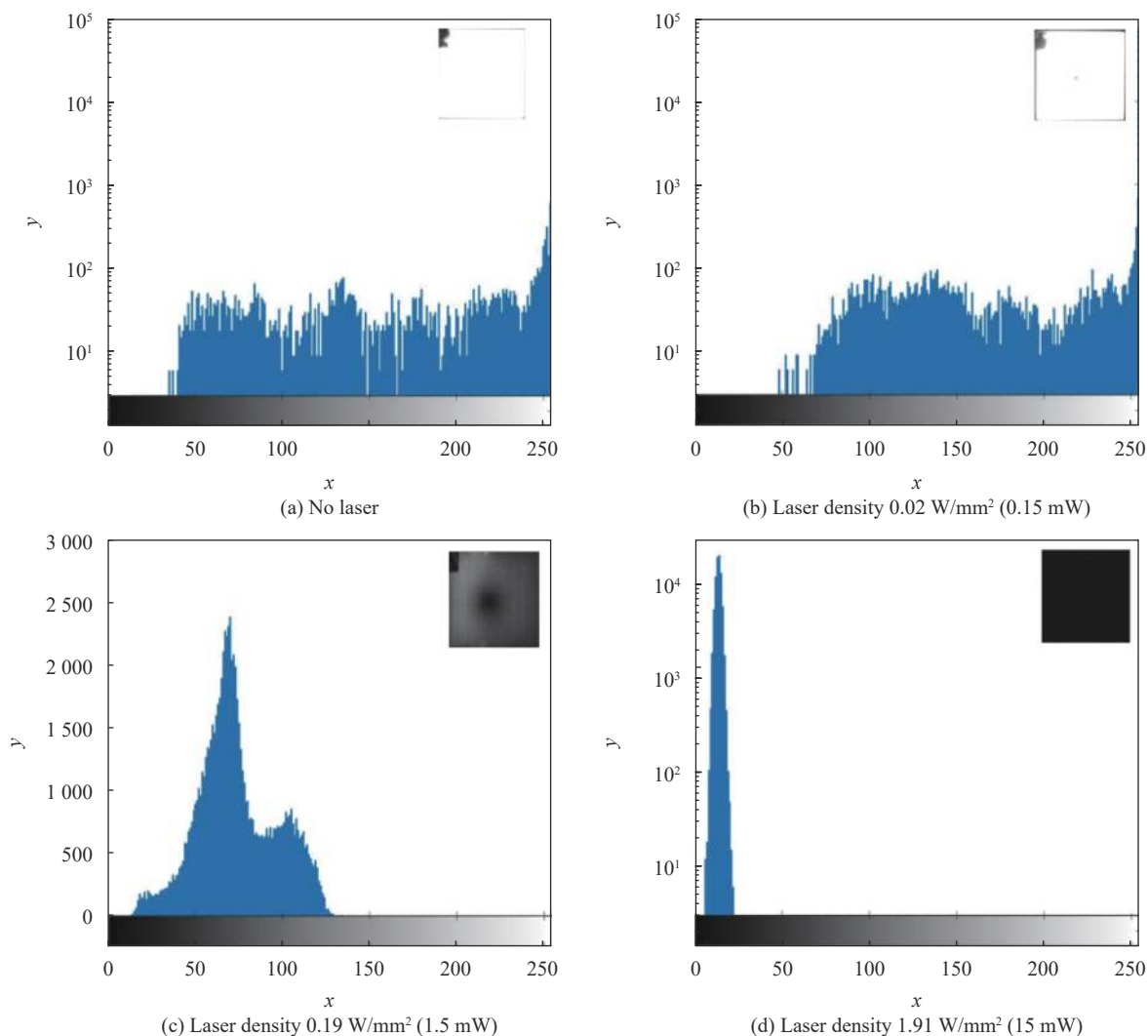


图 14 三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线在皮秒激光辐照下的电致发光变化

Fig.14 Electroluminescent changes of grid lines of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge cells irradiated by picosecond laser

下降,直至完全失去发光能力,可以看出 1.5 mW (0.19 W/mm²) 的激光辐照后,电池几乎失去电致发光能力,由图 13(d) 也看出完全熔断。

不同功率激光辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线部位后电池相对发光强度随激光功率变化如图 15 所示,激光功率对应的功率密度可参见上文。可以发现,电池的相对发光强度随着激光功率的升高而下降,与电池最大功率下降趋势接近,因此,电致发光相对强度变化可以反映电池损伤后的最大输出功率变化。

根据测量得到的实验结果发现,当激光功率达到 0.15 mW 时,电池电性能输出基本不变,随着激光功率增加,电池最大输出功率开始下降,激光功率达到 1.5 mW 时,最大输出功率下降为未辐照电池的一半以下,从损伤形貌来看,栅线电极部位已完全熔断。

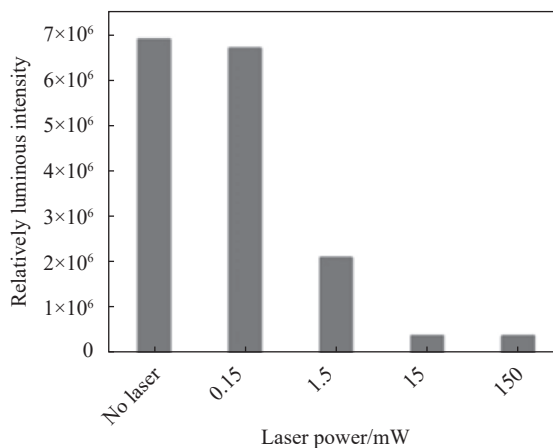


图 15 皮秒脉冲激光多脉冲辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线电极部位后相对发光强度变化随激光功率变化特性

Fig.15 Characteristics of relatively luminous intensity change with laser power after multi-pulse irradiation of picosecond pulse laser on the grid electrode of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge battery

这是由于当激光功率较高时,激光脉冲之间的间隔时间短,脉冲数目多,导致累积在栅线电极上的能量增多,并且真空环境下,累积热作用更加明显,除了对电池内部材料以及结构产生损伤外,也会导致金属栅线电极的熔融,金属栅线的熔断会影响太阳能电池对载流子的收集,进而影响太阳能电池电性能,使得激光辐照栅线部位损伤效果强于辐照非栅线部位。

3 激光辐照电池不同部位损伤对比分析

半导体材料对于激光的吸收机制主要为本征吸收,电子吸收光子能量产生跃迁,形成光生载流子,载流子也会吸收一部分激光能量,并通过弛豫碰撞进行能量交换,最终将能量传导到晶格,晶格温度升高,这种载流子系统与晶格的能量弛豫时间在皮秒量级,所以激光脉冲宽度在皮秒量级及以下时需要考虑载流子通过弛豫碰撞的能量交换时间。皮秒激光作用下,半导体材料晶格的温度升高在载流子温度升高之后,即到皮秒脉冲激光结束辐照后,激光能量还大部分处于载流子系统中。

实验中皮秒激光的脉冲宽度仅为 15 ps,脉冲激光辐照结束后,激光辐照的大部分能量仍然在载流子系统中,通过弛豫碰撞将能量以热传导的形式传导到晶格,从而导致电池温度的升高。实验中所用激光器单脉冲能量较低,激光辐照结束后电池温度上升幅度较小,但是在高重频作用下,短时间内成千上万个脉

冲的能量沉积使电池局部温度过高,发生熔融烧蚀损伤。

表 1 和 2 分别为不同功率皮秒激光辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线与非栅线部位后,电池的最大功率下降情况。根据表中的数据对比发现,相比激光辐照非栅线部位,当激光辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线时,仅 0.15 mW 的激光功率便导致三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池产生损伤,而辐照非栅线部位时激光功率需要达到 1.5 mW 才能产生类似的损伤;当激光功率为 150 mW 时,辐照栅线电极后太阳能电池最大功率下降幅度达到 94.8%,而辐照非栅线部位的下降幅度仅为 27.6%。

辐照非栅线部位的表面形貌测量显示,随着激光功率的增加,激光光束中心辐照区域形成一个逐渐增大的烧蚀坑,由于激光脉宽为皮秒量级,因此形成的烧蚀坑轮廓清晰,烧蚀坑周围区域由于温度低于光电材料熔点而发生氧化还原反应,形成环状致密氧化层。电池电致发光图像显示,尽管激光光斑较小,但电池内部损伤面积随着激光功率的增加而增大。辐照栅线部位时,由于栅线电极受到激光辐照导致熔断,表面形貌测量显示,损伤面积随着激光功率的增加而变大,主要是因为栅线部位受热熔断会影响太阳能电池对载流子的吸收,降低电池的光电转换能力。因此在真空环境下,皮秒激光辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线具有更好的损伤效果。

表 1 皮秒激光辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池非栅线部位最大功率下降幅度

Tab.1 Maximum power reduction of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge cell irradiated by picosecond laser at the non-grid line area

Laser power/mW	1.5	15	150	1500	3 750	15 000
Reduction of battery power	3.4%	17.2%	27.6%	27.6%	37.9%	48.3%

表 2 皮秒激光辐照三结 GaInP₂/GaAs/Ge 电池栅线部位最大功率下降幅度

Tab.2 Maximum power reduction of three-junction GaInP₂/GaAs/Ge cell irradiated by picosecond laser at the grid line area

Laser power/mW	0.15	0.75	1.5	15	150
Reduction of battery power	3.4%	65.5%	75.9%	94.1%	94.8%

4 结束语

文中针对太阳能电池的皮秒脉冲激光辐照损伤,通过光学显微镜获得了太阳能电池的损伤形貌图像,

基于其电致发光特性和伏安特性在损伤前后的变化情况,分析了电池损伤的机理;重点关注了皮秒激光辐照栅线与非栅线部位导致的电池内部损伤机理及特性,相比较于以往研究,文中通过多种测量手段的

综合,分析其损伤机理,并探究电池不同部位损伤之间的差异表现。

实验表明,电池非栅线部位具有一定的抗激光辐照损伤能力,激光功率密度为 1910.83 W/mm^2 时才使电池电性能产生下降,此时激光辐照后电池仍可保持约 51% 的最大输出能力。电池电致发光图像显示,主要是由于电池内部材料有序结构的破坏逐渐增大,尤其是激光功率较高时,内部损伤面积越大。激光辐照电池栅线电极部位的损伤更易导致电池电性能的急剧下降,当激光功率密度为 1.91 W/mm^2 时,最大输出功率降为未损伤前的 5.9%,电池近乎完全损伤,主要是因为栅线电极受到激光辐照熔断导致。

参考文献:

- [1] Fatemi N S, Pollard H E, Hou HQ, et al. Solar array trades between very high-efficiency multi-junction and Si space solar cells[C]//IEEE Photovoltaic Specialists Conference. IEEE, 2000.
- [2] Xiang X B, Du W H, Chang X L, et al. The study on high efficient $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ solar cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, 68(1): 97-103.
- [3] Zou Yonggang, Li Lin, Liu Guojun, et al. Research progress of GaAs solar cell [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 33(1): 44-47. (in Chinese)
- [4] Knechtli R C, Loo R Y, Kamath G S. High-efficiency GaAs solar cells [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1984, 31(5): 577-588.
- [5] Mukind R P. Spacecraft Power Systems[M]. New York: CRC Press, 2005: 1023-1028.
- [6] Iwata H, Asakawa K. Accumulative damage of GaAs and InP surfaces induced by Multiple-Laser-Pulse irradiation [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(4): 2161-2167.
- [7] Li G, Zhang H, Zhou G, et al. Research on influence of parasitic resistance of InGaAs solar cells under continuous wave laser irradiation [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 84(4): 12-14.
- [8] Wang X, Shen Z H, Lu J, et al. Laser-induced damage threshold of silicon in millisecond, nanosecond, and picosecond regimes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(3): 33103.
- [9] Tang Daoyuan, Xu Jianming, Li Yunpeng, et al. Damage effects of tri-junction GaAs solar cells irradiated by continuous-wave laser in vacuum [J]. *Aerospace Shanghai*, 2020, 37(2): 54-60. (in Chinese)
- [10] Li Yongfu. Study on damage mechanism of GaAs material by intense laser [D]. Jinan: Shandong University, 2007. (in Chinese)
- [11] Qi Haifeng. Research on surface damage of GaAs induced by continuous and nanosecond pulse laser [D]. Jinan: Shandong University, 2008. (in Chinese)
- [12] Qiu Dongdong. Damage effects research of silicon solar cells and silicon ccd induced by laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] Tian Xiuqin. Performance research of silicon/gallium arsenide solar cells under femtosecond high power laser illumination [D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)
- [15] Tian Xiuqin, Xiao Si, Tao Shaohua, et al. Damage threshold research of monocrystalline silicon solar cells under femtosecond laser illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 676-680. (in Chinese)
- [16] Lu Weiming, Li Xing, Zhang Fute, et al. Defect detection of solar cell based on electroluminescence and thermography imaging with different bias voltage [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(12): 1511-1519. (in Chinese)
- [17] Li Y H, Pan M, Pang A S, et al. The application of electroluminescence imaging to detection the hidden defects in silicon solar cells [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(4): 378-382. (in Chinese)
- [18] Chang Hao, Chen Yifu, Zhou Weijing, et al. Damage characteristics of the solar cells irradiated by nanosecond pulsed lasers and the effects on photoelectric conversion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(S2): 20210296. (in Chinese)