

# 激光与光电子学进展

## 532 nm 波长连续激光辐照下 GaAs 光伏电池的转换特性及损伤

欧阳辉灿, 尚林, 徐超明, 刘松, 黄鑫, 黄彪, 王豆, 许并社\*

陕西科技大学材料原子分子科学研究所, 陕西 西安 710000

**摘要** 研究了 GaAs 光伏电池在 532 nm 波长连续半导体激光器辐照下的输出特性, 并采用 X 射线衍射、光致发光、电致发光和光学显微镜等方法研究了高功率密度激光下 GaAs 光伏电池的损伤。结果表明: 当激光功率密度为  $0.06 \text{ W/cm}^2$  时, 光伏电池的转换效率最高, 为 26%; 被功率密度为  $15 \text{ W/cm}^2$  的激光辐照 180 s 后, GaAs 光伏电池的性能开始衰减, 衍射强度下降, 半峰全宽增加, 晶体质量变差。高功率密度激光辐照会使 GaAs 光伏电池表面产生裂痕, 且裂痕处在电致发光测试中不发光。此外, 辐照区域的荧光强度有明显降低, 发光峰位也发生了右移。综合表征结果表明, 高功率密度激光辐照会使 GaAs 光伏电池的晶体质量变差并产生非辐射复合中心, 进一步导致材料内部缺陷的形成以及光伏电池光电转换效率的下降。

**关键词** 材料; 半导体激光器; GaAs 光伏电池; 激光辐照; 光致发光; 电致发光

中图分类号 TM914.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1716004

### Conversion Characteristics and Damage of GaAs Solar Cells Irradiated by 532 nm Continuous Laser

Ouyang Huican, Shang Lin, Xu Chaoming, Liu Song, Huang Xin, Huang Biao, Wang Dou, Xu Bingshe\*

Science & Technology Institute of Atomic and Molecular Science of Materials, Shaanxi University, Xi'an 710000, Shaanxi, China

**Abstract** The output characteristics of GaAs solar cells irradiated by a continuous semiconductor laser with a wavelength of 532 nm are investigated in this paper. The damage to GaAs solar cells under high power density laser is investigated via X-ray diffraction, photoluminescence, electroluminescence, and optical microscopy. The results show that when the laser power density of  $0.06 \text{ W/cm}^2$ , the conversion efficiency of the solar cell is the highest, which is 26%; after the cells are irradiated for 180 s by a laser with a power density of  $15 \text{ W/cm}^2$ , the performance of the cells began to decay, the diffraction intensity decreased, the full width at half maximum increased, and the crystal quality deteriorated. High power density laser irradiation can cause cracks on the surface of the GaAs solar cells, and the cracks emitted no light during the electroluminescence test. In addition, the fluorescence intensity in the irradiated area decreased significantly, and the luminescence peak is shifted to the right. The comprehensive characterization results show that high power density laser irradiation will degrade the crystal quality of GaAs solar cells and generate nonradiative recombination centers. These centers will generate internal defects in the material and lead to a reduction in the solar cell photoelectric conversion efficiency.

**Key words** materials; semiconductor laser; GaAs solar cell; laser irradiation; photoluminescence; electroluminescent

## 1 引言

GaAs 光伏电池具有光电转换效率高、抗辐射性

好、耐热性好等优点, 被广泛应用于工业、军事及航天等领域且需求量日益增加<sup>[1]</sup>。相比传统的硅基光伏电池, GaAs 光伏电池在接收相同光照时单位面积的输出

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-08-20; 录用日期: 2021-09-08

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0401803)、国家自然科学基金面上项目(21972103)、新材料界面科学与工程重点实验室开放项目(KLISEAM201904)

通信作者: \*xubingshe@sust.edu.cn

功率提高了 30%，抗辐射性提高了 20%，寿命增加了 40%~60% 不等，这些优点使 GaAs 光伏电池在太空领域具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。

当航天器处于地球背阴面时，如何为航天器供能保持其正常运转成为必须研究的问题。激光具有单色性强、准直性高、传输距离远且不会干扰卫星信号等优点，为处于背阴面的航天器供能提供了一种解决方案<sup>[3-4]</sup>。基于该理念，Glaser<sup>[5]</sup>提出了一种激光无线能量传输(LWPT)的概念，旨在通过地面的激光为航天器供能或建立空间太阳能电站将太阳光转化为激光传输至地面，然后通过太阳能电池接收激光并将其转化为电能储存起来。相同光斑面积下激光的平均功率比太阳光高得多，导致 LWPT 过程中作为激光接收器的光伏电池发生损伤，进而导致光伏电池的性能下降，因

此，对光电器件的损伤进行分析就成为了一个研究热点<sup>[6]</sup>。针对上述问题，本文主要开展了 532 nm 波长连续激光对 GaAs 光伏电池转换特性的影响研究，并通过电池的输出特性变化探究其损伤机理。

## 2 实验设计

图 1 为实验采用的光路图。其中，激光器是波长为 532 nm 且功率可调的连续发射半导体激光器，光束为类高斯光束。激光光束经过准直镜后在电池上形成直径为 6 mm 的圆形光斑，激光功率用激光功率计进行测量。GaAs 光伏电池的尺寸为 3 cm×4 cm，外延结构如图 2(a)所示，实物图如图 2(b)所示。通过电化学工作站(PGSTA302N)输出光伏电池在激光辐照下的输出特性。

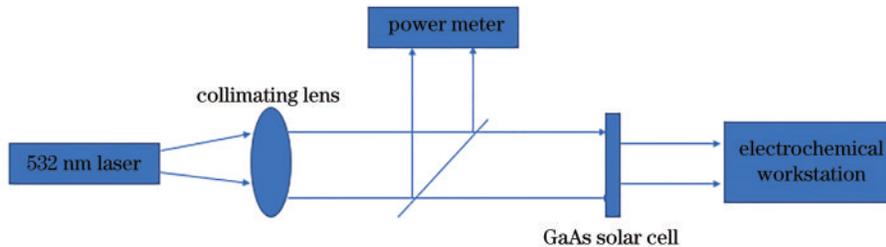


图 1 实验系统的光路图

Fig. 1 Optical path diagram of the experimental system

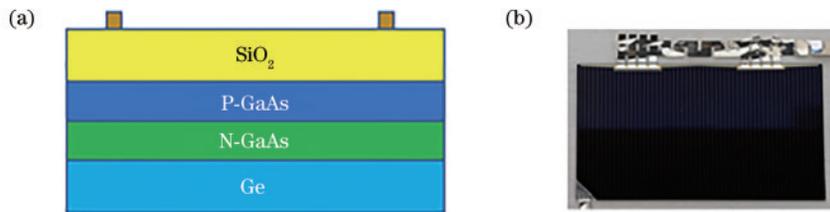


图 2 GaAs 光伏电池的结构。(a)结构示意图；(b)实物图

Fig. 2 Structure of the GaAs solar cell. (a) Schematic diagram of the structure; (b) physical map

## 3 实验结果及分析

### 3.1 532 nm 连续激光辐照下 GaAs 太阳能电池的光电转换特性

用波长为 532 nm 的激光器对 GaAs 光伏电池进行辐照，通过改变激光的功率密度得到 GaAs 光伏电池的电流-电压(I-V)曲线，如图 3 所示。可以发现，随着激光功率密度的增加，光伏电池 I-V 曲线的平缓区域(I-V 曲线接近于直角的程度)<sup>[7]</sup>逐渐减小，光伏电池的填充因子也逐渐减小。原因是在大功率密度激光辐照下电池的耗尽层变宽且热阻效应明显<sup>[8]</sup>，引起复合电流的升高，从而消耗了更多的输出电流。此外，高功率密度激光辐照时，光伏电池的串联电阻会增大，导致内阻上的无效负载电压增加，从而降低最大输出功率，增加短路电流<sup>[9]</sup>。

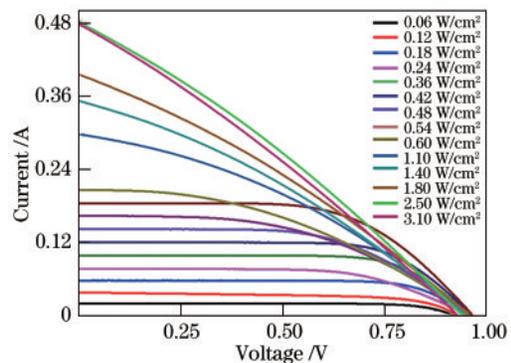


图 3 GaAs 光伏电池的 I-V 曲线

Fig. 3 I-V curve of the GaAs solar cell

图 4(a)为电池短路时电流随激光功率密度的变化曲线。可以发现：随着激光功率密度的增加，电池的短路电流先线性增加，随后增长趋势逐渐变缓，在激光功

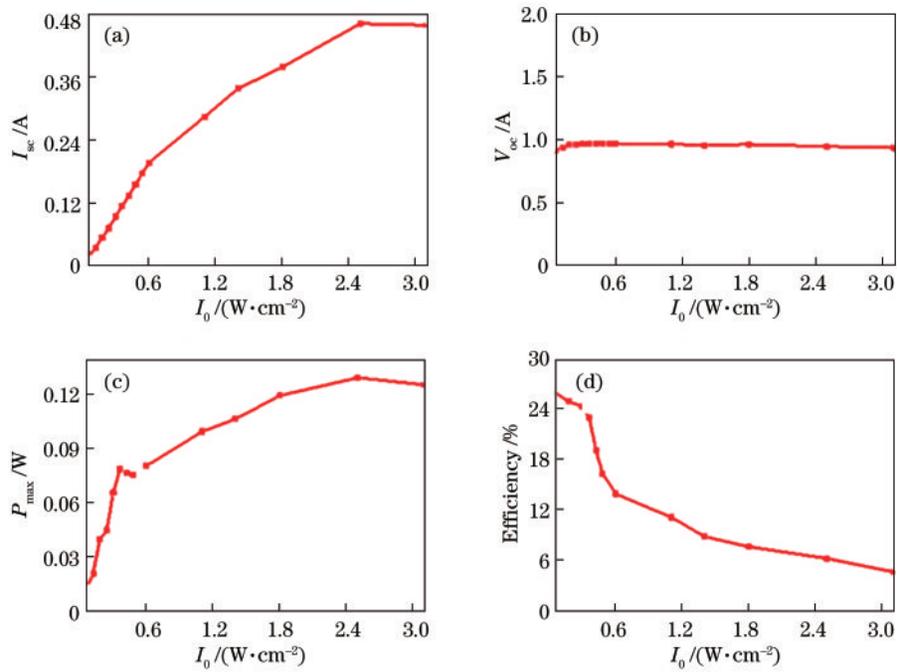


图4 GaAs 光伏电池的光电特性。(a)短路电流;(b)开路电压;(c)最大输出功率;(d)光电转换效率

Fig. 4 Photoelectric properties of GaAs solar cells. (a) Short circuit current; (b) open circuit voltage; (c) maximum output power; (d) photoelectric conversion efficiency

率密度小于  $2.4 \text{ W}/\text{cm}^2$  时,短路电流( $I_{sc}$ )逐渐增加且最大值为  $0.48 \text{ A}$ ;当激光功率密度大于  $2.4 \text{ W}/\text{cm}^2$  时,短路电流逐渐趋于饱和。原因是激光功率密度较低时,光生载流子随着激光功率密度的增强而增加,光生电流也逐渐增加,进而使短路电流增加;激光功率继续增大时,光生载流子增加的速率逐渐减慢并最终趋于饱和,使光生电流增大速度减缓并趋于饱和。图 4(b) 为 GaAs 光伏电池的开路电压( $V_{oc}$ )随激光功率密度的变化曲线。可以发现, GaAs 光伏电池的开路电压几乎不受激光功率密度的影响,且一直稳定在  $0.94 \text{ V}$  左右。原因是 GaAs 光伏电池的开路电压主要与半导体材料本身的性质如禁带宽度、掺杂浓度等有关。图 4(c) 为 GaAs 光伏电池最大输出功率随激光功率密度的变化曲线。可以发现, GaAs 光伏电池的最大输出功率( $P_{max}$ )随激光功率密度的增大而增大并最终趋于饱和。原因是激光功率密度较小时,电池的 I-V 曲线退化不严重且最大输出功率随短路电流的增加逐渐增加,当激光功率密度继续增加时,短路电流趋于饱和, I-V 曲线也严重退化。图 4(d) 为 GaAs 光伏电池的光电转换效率(Efficiency)随激光功率密度的变化曲线。可以发现,当激光功率密度为  $0.06 \text{ W}/\text{cm}^2$  时,电池的转换效率最大,为  $26\%$ ,随着激光功率的继续增加,转换效率逐渐减小。原因是电池的热阻效应加剧<sup>[10]</sup>,导致输出电流减小,而开路电压几乎不变,最终导致输出功率的增加跟不上激光输入功率的增幅,从而使激光的转换效率逐渐降低。

### 3.2 高功率密度激光辐照下 GaAs 光伏电池的转换特性

高功率密度(激光功率密度  $I_0=15 \text{ W}/\text{cm}^2$ )激光辐照前后(辐照时间为  $180 \text{ s}$ ),分别用功率密度为  $0.60$ 、 $0.45 \text{ W}/\text{cm}^2$  的激光对 GaAs 光伏电池进行辐照,得到的 I-V 曲线如图 5(a) 所示。其中,正三角形和正方形曲线为高功率激光辐照前光伏电池的 I-V 曲线,倒三角形和空心圆曲线为高功率激光辐照后的 I-V 曲线。可以发现,经过高功率激光辐照后电池的短路电流出现了明显下降,且幅度约为  $40 \text{ mA}$ ,这表明电池在高功率激光辐照后出现了损伤,进而导致电池性能下降。为了找出激光辐照电池的损伤机理,进一步对电池进行了表征。在高功率激光辐照前后分别对 GaAs 光伏电池进行了高分辨 X 射线衍射仪(HR-XRD)表征,结果如图 5(b) 所示。可以发现,经过高功率密度激光辐照后 GaAs 光伏电池的 X 射线衍射仪(XRD)强度下降了近一半,其半峰全宽(FWHM)在高功率激光辐照前的弧度为  $298 \text{ rad}$ ,被高功率激光辐照后增大到了  $365 \text{ rad}$ ,增加了  $67 \text{ rad}$ 。对于材料而言,衍射峰的 FWHM 增大,表示晶体质量变差。因此,高功率激光辐照后会使得 GaAs 材料的晶体质量变差,原因是被激光辐照后 GaAs 晶体内的缺陷数量增加。

### 3.3 高功率密度激光辐照后 GaAs 光伏电池在光学显微镜下的损伤形貌

图 6 为被高功率激光辐照后 GaAs 光伏电池的扫描电子显微镜(SEM)图像。可以发现,经高功率激光辐照后, GaAs 光伏电池的表面已经出现了明显裂痕,

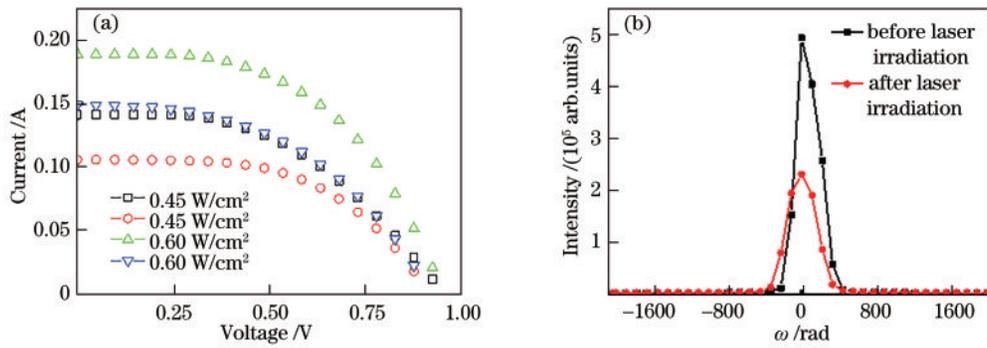


图 5 激光辐照前后 GaAs 光伏电池性能及材料表征。(a)GaAs 光伏电池的 I-V 曲线;(b)GaAs 光伏电池的 XRD

Fig. 5 Performance and material characterization of GaAs solar cells before and after laser irradiation. (a) I-V curve of GaAs solar cell; (b) XRD of GaAs solar cell

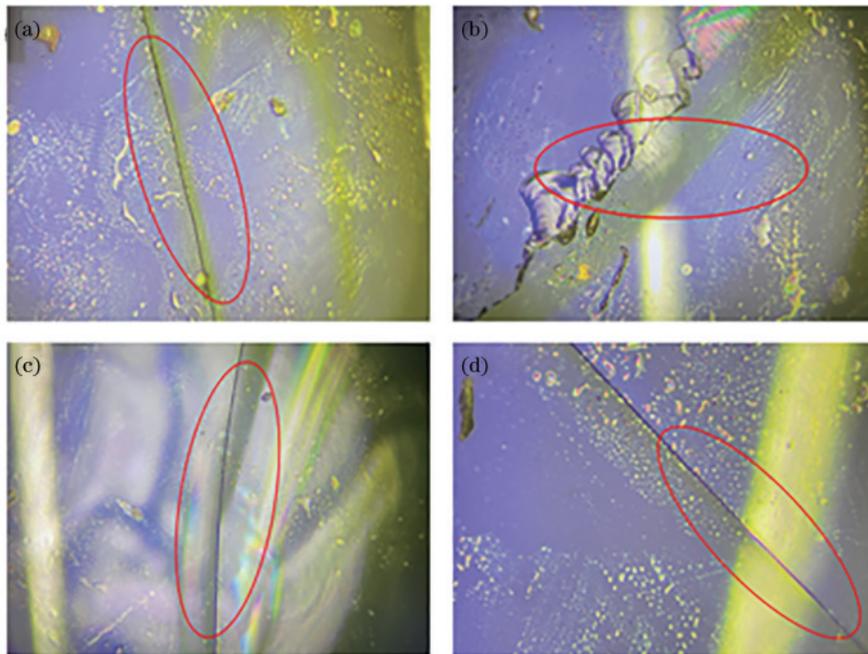


图 6 GaAs 光伏电池激光辐照区域的 SEM 图。(a)~(d)区域 1~区域 4

Fig. 6 SEM image of the laser-irradiated area of a GaAs solar cell. (a)~(d) Area 1- area 4

图中圆圈区域的电池栅线也发生了熔断。原因是在高功率激光辐照下热效应累积产生的热应力使电池产生裂痕<sup>[11]</sup>。为了进一步探究其损伤的微观机理,继续对电池进行了荧光表征,以反映电池内部缺陷数量的变化情况。

### 3.4 光致发光表征 GaAs 光伏电池的损伤

图 7 为经高功率激光辐照前后 GaAs 光伏电池的电致发光(EL)和光致发光(PL)表征结果,可以反映材料的缺陷数量。其中,图 7(a)为电池辐照区域的 PL 光谱,图 7(b)为经高功率辐照后电池的 EL 图。可以发现,经过激光辐照后的区域通电后不发光,未辐照区域则正常发光。电致发光测试出现不发光区域的原因是激光辐照使电池表面的栅线熔断,而栅线的作用则是收集载流子<sup>[12]</sup>。电池的荧光发光强度从未辐照区域到辐照边缘区域再到辐照中心区域逐渐减小,且发光

峰值也在红移。原因是半导体晶体晶格中的原子都是按规律排列的,在最低能态系统最稳定。当光伏电池受到辐照时,受到辐照的粒子会发生碰撞,使晶格原子发生位移,一级离位原子可能引发二级位移,形成许多缺陷(如 Frankel 缺陷)。因此辐照产生的空位和间隙原子受到干扰,晶格的完整性受到破坏,进而导致光致发光强度大大降低<sup>[13]</sup>。图 7(c)为未被辐照区域的 PL 图,其中,图像的颜色越亮,表明发光强度越强。可以发现,未辐照区域的光致发光成像图颜色较为均匀。图 7(d)为被辐照区域的 PL 图,可以清楚地看到此时图像颜色不均匀且存在大量黑斑,这与电致发光测试结果比较吻合。同时发光强度越强,表明材料中非辐照复合中心越少<sup>[14]</sup>。无论从电致发光还是光致发光的角度都可以发现,电池的发光强度都是降低的,这表明高功率激光辐照会给电池带来更多的非辐射复合中

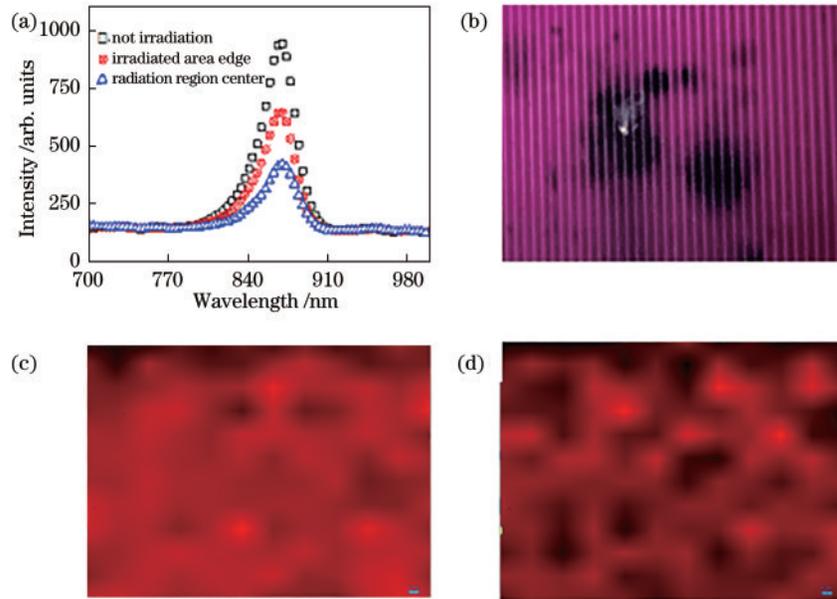


图7 GaAs光伏电池的发光性能。(a)GaAs光伏电池的PL图;(b)辐照区域的EL图;(c)未辐照区域的PL图;(d)辐照区域的PL图  
Fig. 7 Luminescent properties of GaAs solar cells. (a) PL image of GaAs solar cell; (b) EL image of irradiated area;

(c) PL image of unirradiated area; (d) PL image of irradiated area

心,从而减少被激发的载流子,导致发光效率降低。此外,深能级、大俘获截面以及辐照后电池中缺陷浓度的增加均会导致电池性能的直接衰减,这也是图5中电池I-V曲线出现下降的原因。

## 4 结 论

用532 nm激光辐照GaAs太阳能电池,结果表明:当激光的功率密度为 $0.06 \text{ W/cm}^2$ 时,电池的转换效率最高,为26%,之后电池的转换效率随激光功率密度的增加逐渐减小,而电池的短路电流先呈线性增加,然后增长趋势逐渐降缓;当激光功率密度为 $2.4 \text{ W/cm}^2$ 时,短路电流最大为0.48 A,之后趋于不变,而开路电压几乎不随激光功率密度的变化而变化,一直稳定在0.94 V左右;电池的最大输出功率随激光功率密度的增加而增加,并最终趋于饱和,且随着激光功率的进一步增大,光伏电池的性能会出现衰减。XRD测试表明,经过高功率密度激光辐照后GaAs光伏电池的衍射峰强约下降了一半,且GaAs光伏电池在高功率激光辐照后XRD的FWHM也增加了67 rad,这意味着材料的晶体质量变差,原因主要是高功率激光辐照下由热效应累积产生的热应力使电池产生裂痕断栅,电池在宏观上出现损伤。此外,激光辐照会使电池材料的晶格发生位移,形成许多缺陷,且因辐照产生的空位和间隙原子会受到干扰,使晶格的完整性受到破坏。

## 参 考 文 献

[1] 李定海. 中国砷化镓太阳能电池的发展研究[J]. 中国金属通报, 2018(2): 39.  
Li D H. Research on the development of GaAs solar cells

in China[J]. China Metal Bulletin, 2018(2): 39.

- [2] 吴晓莉. 浅述光伏电池的研究发展趋势[J]. 科技创新导报, 2012, 9(22): 35.  
Wu X L. The development trend of photovoltaic cell research is briefly described[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2012, 9(22): 35.
- [3] Cheng K W E, Lu Y. Development of a contactless power converter[C]//2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02, December 11-14, 2002, Bangkok, Thailand. New York: IEEE Press, 2002: 786-791.
- [4] Green A W. 10 kHz inductively coupled power transfer-concept and control[C]//Proceedings of 5th International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, London, UK. London: IET, 1994: 694-699.
- [5] Glaser P E. Power from the sun: its future[J]. Science, 1968, 162(3856): 857-861.
- [6] 孙承纬. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
Sun C W. Laser irradiation effect[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [7] 翟涵, 谢华清, 吴子华, 等. 测量方式对太阳电池输出性能测试的影响[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 36-42.  
Zhai H, Xie H Q, Wu Z H, et al. Influence of measurement methods on photovoltaic parameters of solar cells[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(1): 36-42.
- [8] 李巍, 吴凌远, 王伟平, 等. 半导体激光无线传能中光伏电池转换效率[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(11): 119001.  
Li W, Wu L Y, Wang W P, et al. Power conversion efficiency of photovoltaic cells in semiconductor laser wireless power transmission[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(11): 119001.

- [9] 戚磊, 张蓉竹. 复合脉冲激光辐照下三结 GaAs 电池的损伤特性[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0514002.  
Qi L, Zhang R Z. Damage characteristics of three-junction GaAs cells irradiated by composite pulsed laser [J]. Acta Optica Sinica 2020, 40(5): 0514002.
- [10] 华文深, 刘晓光, 张大铭. 激光辐照单结砷化镓光伏电池的输出特性[J]. 激光与红外, 2016, 46(12): 1463-1466.  
Hua W S, Liu X G, Zhang D M. Laser & Infrared, 2016, 46(12): 1463-1466.
- [11] Guo F, Zhu R Z, Wang A, Cheng X A. Damage effect on CMOS detector irradiated by single-pulse laser[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8905: 890521.
- [12] 陈文志, 张凤燕, 张然, 等. 基于电致发光成像的太阳能电池缺陷检测[J]. 发光学报, 2013, 34(8): 1028-1034.  
Chen W Z, Zhang F Y, Zhang R, et al. Defect detection of solar cells based on electroluminescence imaging[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(8): 1028-1034.
- [13] Yan Y Y, Fang M H, Tang X B, et al. Effect of 150 keV proton irradiation on the performance of GaAs solar cells[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2019, 451: 49-54.
- [14] Wang J L, Yi T C, Zheng Y, et al. 3.0 MeV proton-irradiation induced non-radiative recombination center in the GaAs middle cell and the GaInP top cell of triple-junction solar cells[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 93: 012060.