

单晶 Si、单结 GaAs 太阳能电池的 激光损伤特性对比研究

朱荣臻¹, 王睿^{1*}, 江天¹, 许中杰¹, 程湘爱^{1,2}

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科学技术大学 高性能计算国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:采用 1064 nm 纳秒脉冲激光辐照单晶 Si、单结 GaAs 太阳能电池, 针对不同强度激光辐照太阳能电池的损伤特性进行了实验研究, 得出激光光斑聚焦在电池栅线上时, 电池更易损伤, 单晶 Si 电池的栅线打断之后仍能很好工作, 单结 GaAs 电池却完全失效, 这是由于高掺杂的基底锗熔融凝固连接栅线, 导通电池正负极. 实验结果还表明, 激光辐照在电池表面时, 对单晶 Si 电池基本没有影响, 而 GaAs 电池输出性能也没有很大幅度的下降. 理论分析了纳秒激光对电池的损伤主要是热、力效应共同作用的结果. 热效应使材料熔化、气化, 力效应主要沿着激光传输的方向, 垂直于材料表面. 常温下 Si 材料对 1064 nm 有较强的本征吸收, GaAs 电池的 GaAs 层透过 1064 nm, Ge 基底本征吸收 1064 nm, Ge 材料的熔点低于 Si 材料且其禁带宽度更窄, 故其初始损伤阈值略低. 通过 SEM 扫描电镜、激光拉曼材料分析及 X 射线光电子能谱仪等分析手段对实验结果进行了验证.

关键词:太阳能电池; 激光损伤; 单晶 Si; 单结 GaAs; COMSOL; 扫描电镜; X 射线光电子能谱仪
中图分类号: TB43 **文献标识码:** A

Research of laser irradiation effect on monocrystalline silicon solar cells and single junction GaAs solar cells

ZHU Rong-Zhen¹, WANG Rui^{1*}, JIANG Tian¹, XU Zhong-Jie¹, CHENG Xiang-Ai^{1,2}

(1. College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

2. State key Laboratory of High Performance Computing, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Monocrystalline silicon and single junction GaAs/Ge solar cells irradiated by 16 ns pulse-duration with the laser at 1064 nm wavelength for different fluences (energy densities) were studied. It was found that solar cell is easily damaged when laser spot was focused on the metal gridlines, meanwhile, monocrystalline silicon solar cell was almost undamaged when laser spot was focused on the surface, GaAs/Ge solar cells' performance didn't decrease greatly. Theoretically, the damage of nanosecond pulse mainly commons heat and dynamics effects. The high temperature melts and gasifies materials and the dynamical effect is along the laser's transmitting direction vertical to the surface of materials. Investigation also indicates that monocrystalline Si cells and the thick germanium base intrinsically absorb 1064 nm strongly, while the GaAs/Ge is transparent to 1064 nm, The melting point of germanium material is lower than that of silicon, so its damage threshold is lower. These experimental conclusions were proved and verified by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS).

Key words: solar cells, laser-induced damage, monocrystalline silicon, single junction GaAs, COMSOL, SEM, XPS
PACS: 88.40.H

引言

激光与物质相互作用自激光器发明以来就引起广泛的重视,不仅由于它是限制高功率激光强度发展的至关键因素,而且也是限制激光加工技术广泛应用的关键问题.强激光加工太阳能电池成为电池制作工艺中一个关键技术,因此探索小光斑激光辐照太阳能电池的作用机理对改善电池的制作工艺及太阳能电池抗损伤能力的加固具有重大意义.国内外已有大量激光辐照光学材料及光电器件的研究^[1-5],但针对太阳能电池激光损伤特性的研究仍较少^[6,7],而且主要针对大光斑激光辐照电池的损伤,为此研究太阳能电池的小光斑激光辐照效应,以探索太阳能电池的抗激光损伤能力十分必要.

1 实验方案

实验光路如图 1 所示,激光器输出波长为 1064 nm,脉宽 16 ns,重频 1~10 Hz 可调,其中,聚焦后激光光斑尺寸 0.2 mm,激光光斑由 CCD 在暗背景场情况下拍摄,通过计算光斑灰度值分布得出.衰减器用来调节激光能量大小,能量计用来实时监测激光能量,源表用来测量电池的 $I-V$ 特性,示波器用来实时测量电池输出电压变化,卤素灯模拟太阳光,实验过程中保持各器材角度距离不变.

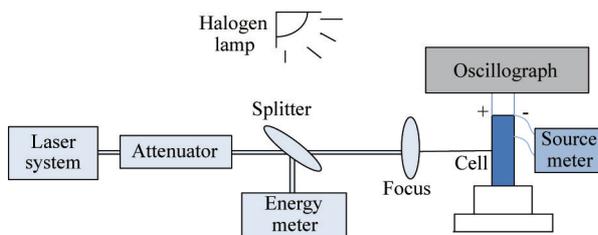


图 1 激光辐照太阳能电池光路图
Fig. 1 Beam path of solar cells under laser irradiation

实验样品两种:单晶硅电池尺寸为 20 mm × 40 mm,单结 GaAs 电池尺寸为 30 mm × 40 mm.

2 实验结果

2.1 激光辐照前后电池 $I-V$ 曲线

2.2 光学显微镜下损伤形貌

纳秒多脉冲激光辐照下,电池损伤形貌主要表现为材料的熔融流动再凝固以及烧蚀,随着激光能量的增大及脉冲数量的增多,破斑面积增大,破坏深度也加大^[8].而单结 GaAs/Ge 电池的损伤阈值比单

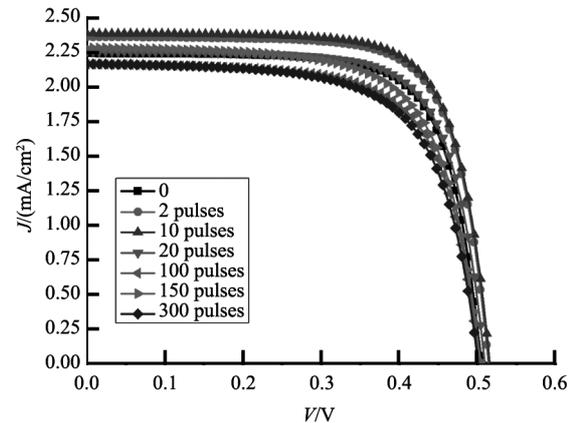


图 2 单晶硅电池不同脉冲数量激光辐照表面的 $I-V$ 曲线(单脉冲能量密度为 150 J/cm²)

Fig. 2 $I-V$ curves of monocrystalline silicon solar cells irradiated on the surface by different pulses (single-shot pulse fluence is 150 J/cm²)

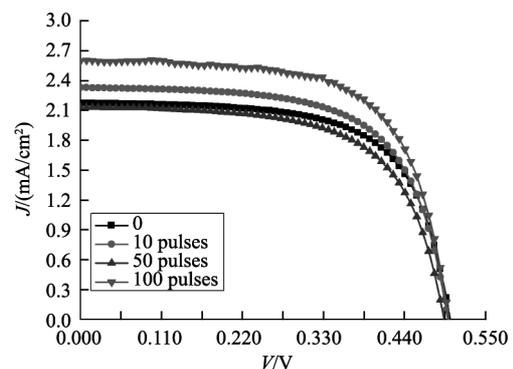


图 3 单晶硅电池不同脉冲数量激光辐照栅线的 $I-V$ 曲线(单脉冲能量密度 150 J/cm²)

Fig. 3 $I-V$ curves of monocrystalline silicon solar cells irradiated on the gridlines by different pulses (single-shot pulse fluence is 150 J/cm²)

晶 Si 的低得多,这是因为材料禁带宽度越窄越容易损伤^[9].

3 结果分析

3.1 激光损伤电池结果分析

两种电池激光损伤前后 $I-V$ 曲线及最大输出功率曲线分析得,激光辐照单结 GaAs/Ge 电池表面的初始损伤出现在能量密度为 70 J/cm² 的 2 个脉冲辐照后,最后导致电池完全失效的激光能量密度为 70 J/cm² 的 10 个脉冲辐照后,这是因为随着激光能量增大,高斯光斑损伤面积增大,触及到栅线.激光辐照单结 GaAs/Ge 电池栅线时的完全损伤阈值为 60~120 J/cm²,激光辐照后,万用表测得相同环境下单晶硅电池的电阻略有减小,这是由于损伤后的

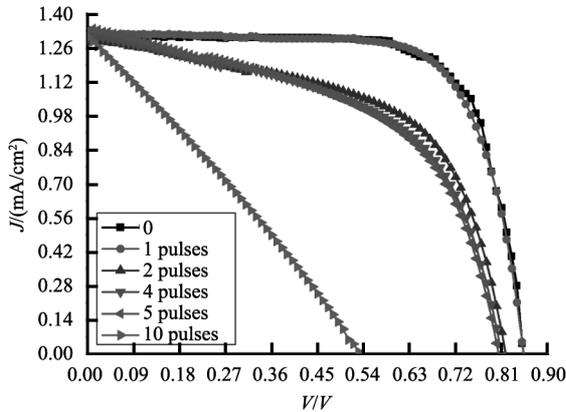


图4 单结 GaAs/Ge 电池不同脉冲数量激光辐照表面的 I-V 曲线(单脉冲能量密度 70 J/cm²)

Fig. 4 I-V curves of GaAs/Ge solar cells irradiated on the surface by different pulses (single-shot pulse fluence is 70 J/cm²)

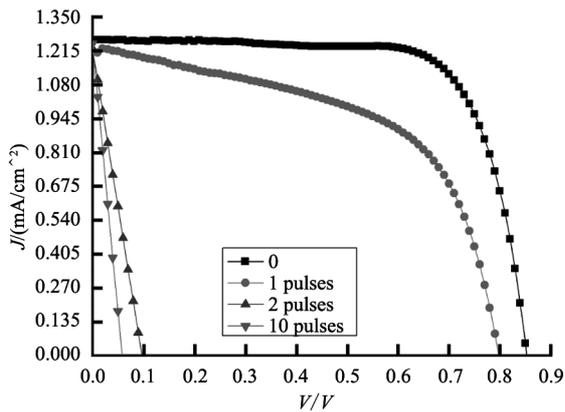


图5 单结 GaAs/Ge 电池不同脉冲数量激光辐照栅线的 I-V 曲线(单脉冲能量密度 60 J/cm²)

Fig. 5 I-V curves of GaAs/Ge solar cells irradiated on the gridlines by different pulses (single-shot pulse fluence is 60 J/cm²)

电池体内缺陷增多,漏电流增大,单结 GaAs/Ge 电池的电阻大幅度减小,完全损伤后电池电阻变为十几欧姆,相当于电池正负极被短路。

3.2 纳秒单脉冲激光损伤数值分析

使用 COMSOL 软件计算半导体材料在脉宽 16 ns,重频 1 Hz,光斑直径 0.2 mm 的激光辐照下,材料瞬间升温情况,波长的影响在于材料对光的吸收系数的不同。

热传导模型:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q(I, T)}{k} = \frac{\rho C}{k} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

其中,ρ, C, T, t, k 分别是材料的密度,比热容,温度,时间,导热系数. 材料的热物性参数如下表所

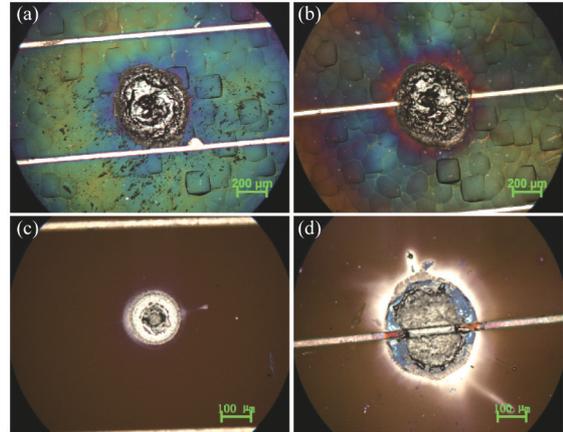


图6 光学显微镜下电池的损伤形貌. 单晶 Si 电池(a) 损伤表面和(b)损伤栅线;单结 GaAs/Ge 电池(c) 损伤表面和(d)损伤栅线

Fig. 6 Morphologies of solar cells irradiated by pulsed laser under optical microscopy. Damaged monocrystalline silicon solar cell (a) surface and (b) gridline irradiated by ten pulses at 150 J/cm². Damaged GaAs/Ge solar cell (c) surface and (d) gridline irradiated by single pulse at 70 J/cm²

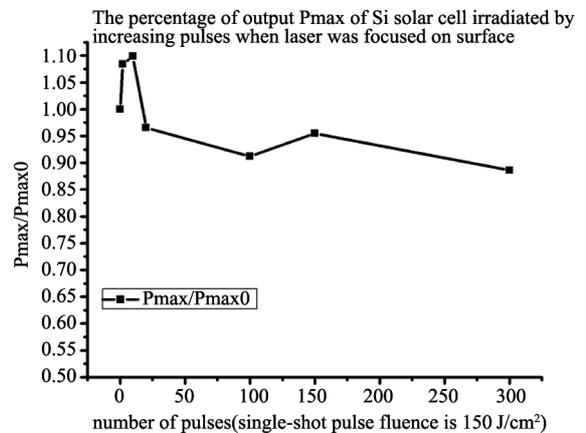


图7 单晶 Si 电池最大输出功率占损伤前的最大输出功率百分比随着激光脉冲数量增加变化(表面)

Fig. 7 Changes of the percentage of output Pmax of Si solar cells irradiated by increasing pulses(surface)

示.

表1 Si、Ge、GaAs 的热物理参数

Table 1 Thermal physical parameters of Si, Ge, GaAs

参数	密度 (g·cm ⁻³)	比热容 (J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	熔化温度 (K)	能隙 (eV)	导热系数 (W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹)
Si	2.33	0.95	1687	1.170-4.73 × 10 ⁻⁴ T ² /(T+636)	299/(T-99)
Ge	5.32	0.32	1211	0.7437-4.774 × 10 ⁻⁴ T ² /(T+235)	0.2
GaAs	5.31	0.307	950 (分解)	1.519-5.045 × 10 ⁻⁴ T ² /(T+204)	0.425

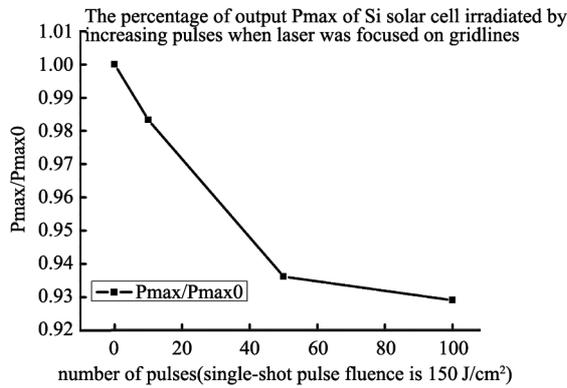


图8 单晶 Si 电池的最大输出功率百分比随着激光脉冲数量增加变化(栅线)

Fig. 8 Changes of the percentage of output P_{max} of Si solar cells irradiated by increasing pulses (gridlines)

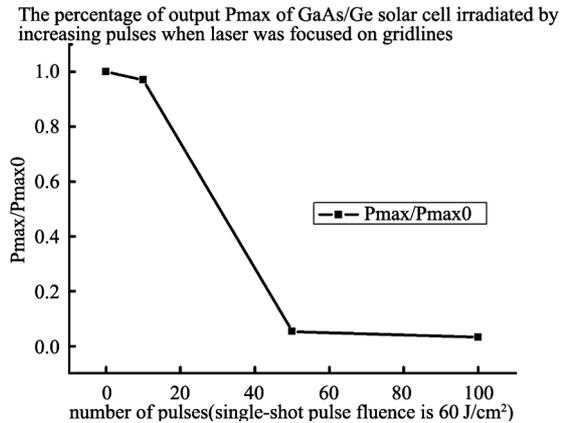


图10 单结 GaAs/Ge 电池的最大输出功率百分比随着激光脉冲数增加变化(栅线)

Fig. 10 Changes of the percentage of output P_{max} of GaAs/Ge solar cells irradiated by increasing pulses (gridlines)

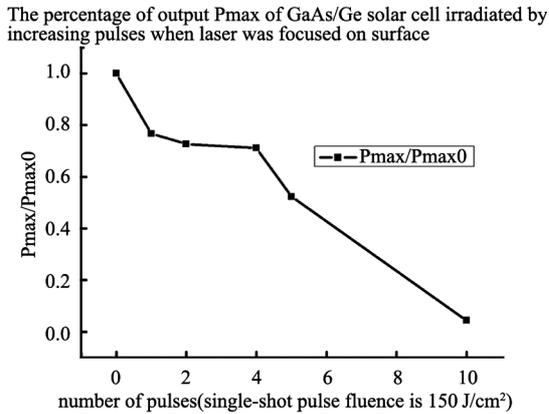


图9 单结 GaAs/Ge 电池的最大输出功率百分比随着激光脉冲数量增加变化(表面)

Fig. 9 Changes of the percentage of output P_{max} of GaAs/Ge solar cells irradiated by increasing pulses (surface)

热源表示为,

$$Q(I) = \alpha(1-R)I^{guass}(\tau_p) \exp(-2\frac{r^2}{a^2}) \exp(-\alpha z) \quad (2)$$

脉冲激光表示为,

$$I^{guass}(\tau_p) = I_{th} \exp[(\tau/\tau_p)^2] \quad (3)$$

其中 τ_p 是脉宽, τ 是热扩散时间, α 是材料对光的吸收系数, R 是材料表面反射率, a 是激光半径, I_{th} 是激光中心光强度.

考虑到空气对流及热辐射,边界条件变为,

$$K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = h(T' - T(r, 0, t)) + \varepsilon \sigma (T_0^4 - T'^4(r, 0, t)) \quad (4)$$

T 是材料的温度, T' 是材料周围空气温度即初始温度 T_0 . h 是表面热对流系数, ε 是表面辐射系数, σ 是斯特藩常数.

如图 11 所示, 半导体材料在 16 ns 脉宽激光辐照下, 材料温升随时间变化图. 图中采用的激光能量密度对应恰好使材料升温至熔点的值. Si 在 16 ns 脉宽 0.4 J/cm² 激光辐照下瞬间温升到熔点 1 687 K, GaAs 在 16 ns 脉宽 0.25 J/cm² 激光辐照下瞬间温升到分解温度 950 K, Ge 在 16 ns 脉宽 0.3 J/cm² 激光辐照下瞬间温升到熔点 1 211 K.

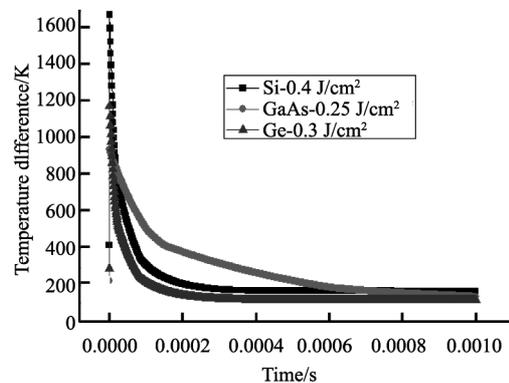


图11 不同激光能量密度下半导体材料依赖于时间的温升

Fig. 11 Time evolution of the temperature of different semiconductor materials at the surface at different laser fluences

数值分析结果表明, 半导体材料 Si、GaAs、Ge 在同一波长、脉宽、能量的激光辐照下, 最先达到损伤的依次是 GaAs、Ge、Si; 由此也验证了单晶 Si 电池比 GaAs/Ge 电池更难损伤. 数值模拟结果和实验结果有量级上的差距, 分析原因是由于电池表面有抗反射膜、电池栅线及外界污染的杂质成分对光吸收有影响, 且模型考虑了热辐射及热扩散的因素, 本文定

义损伤阈值为电池输出性能的下降,所以电池的损伤阈值比半导体材料高很多。

3.3 扫描电镜结果分析

SEM (scanning electron microscopy) 观察激光辐照后的电池损伤表面和击穿后侧面形态分别如图 12 和图 13 所示。

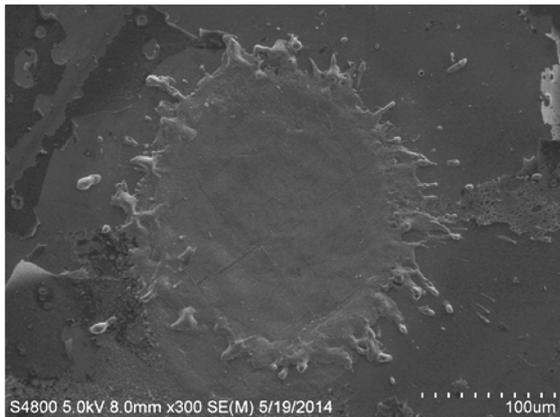


图 12 SEM 拍摄单脉冲激光辐照 GaAs/Ge 电池的损伤形貌

Fig. 12 GaAs/Ge solar cell' morphologies irradiated by single pulse under SEM

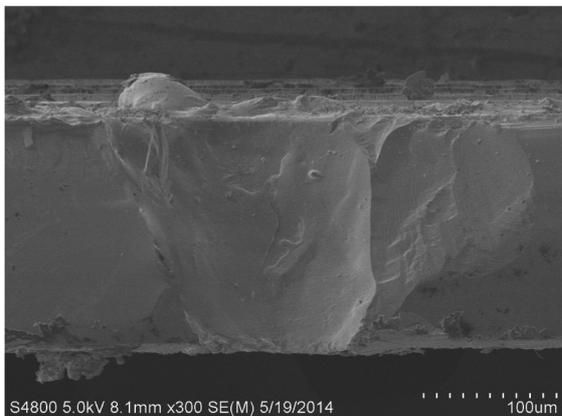


图 13 SEM 拍摄激光击穿 GaAs/Ge 电池损伤形貌

Fig. 13 Morphology of GaAs/Ge solar cell punctured by laser under SEM

3.4 Energy Dispersive Spectrometer (EDS) X 射线能谱仪分析

X 射线能谱仪是和 SEM 配套使用的微区材料分析系统,EDS 对电池损伤和未损伤区域进行微区元素分析表明:纳秒单脉冲损伤区域的单晶 Si 电池材料并未变化,仍是 Si,万用表测量电池整体电阻在暗背景场作用下保持在十千欧量级.单结 GaAs/Ge 电池激光辐照区域 GaAs 分解,As 元素含量减少,未损伤区域是 GaAs/Ge 成分,电池表面是 TiO_2 及 SiO_2

抗反射膜.图 6 (b) 进行 EDS 分析表明,Ge 材料溅射出来覆盖栅线,而且掺杂浓度较高的锗的导电率也较高,导致电池上下电极导通,测量电池正向电阻负向电阻变为十几欧姆。

3.5 微区拉曼分析

激光拉曼分析探测深度达几个微米,结果表明,单晶硅电池激光辐照前后区域都含有大量的硅,单晶硅电池在脉冲激光辐照后单晶变为多晶硅,对电池的性能是没有损伤影响的^[10].GaAs 电池未损伤表面没有拉曼响应,GaAs 电池损伤区域只有大量的锗,GaAs 电池的 GaAs 层只有几微米厚,激光辐照后出现熔融损伤形貌,是 Ge 价带电子本征吸收 1 064 nm 光子的能量 (常温下 $h\nu = 1.165 \text{ eV}$) 的 0.664 eV 部分,跃迁到导带,形成电子-空穴对,载流子将光子多余的能量传递给晶格,造成材料的温升,Ge 将温度热传导给 GaAs, GaAs 材料达到分解温度 950 K,而 Ge 在 1211 K 时熔化,产生熔融流动再凝固的损伤形貌。

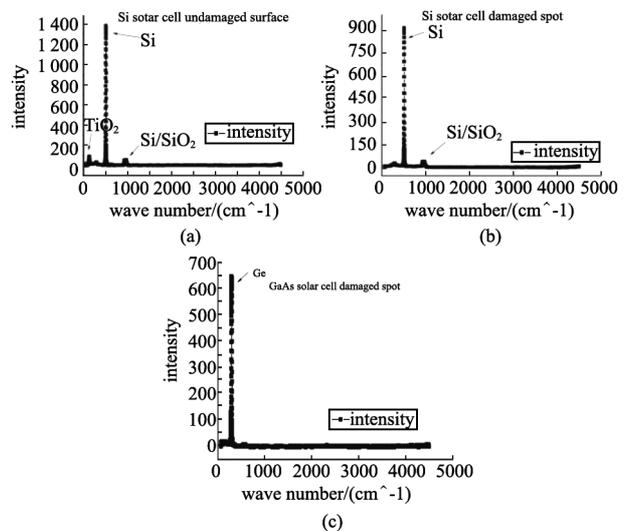


图 14 太阳能电池损伤和未损伤区域的激光拉曼分析. (a) 未损伤单晶 Si 电池表面, (b) 损伤单晶 Si 电池表面, (c) 单结 GaAs/Ge 电池损伤坑里面

Fig. 14 Solar cells' Raman spectrum of damaged and undamaged zone. (a) Monocrystalline silicon solar cells' undamaged surface, (b) monocrystalline silicon solar cells' damaged surface, (c) GaAs/Ge solar cell' damaged dot

3.6 X 射线光电子能谱仪结果分析

通过 X 射线光电子能谱仪 (XPS) 探测电池损伤区域和未损伤区域的材料组成成分,分析电池损伤机理.单晶 Si 和 GaAs/Ge 电池损伤表面的 XPS 分析结果分别如图 15 和图 16 所示.其中涉及设备参数光斑尺寸: $d = 200 \mu\text{m}$,电子枪: 20.0 eV.

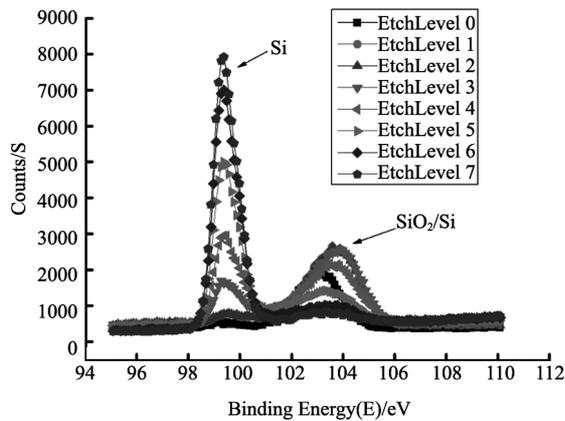


图 15 XPS 分析单晶硅电池损伤区域材料
Fig. 15 XPS spectrum of monocrystalline silicon solar cells' damaged dot

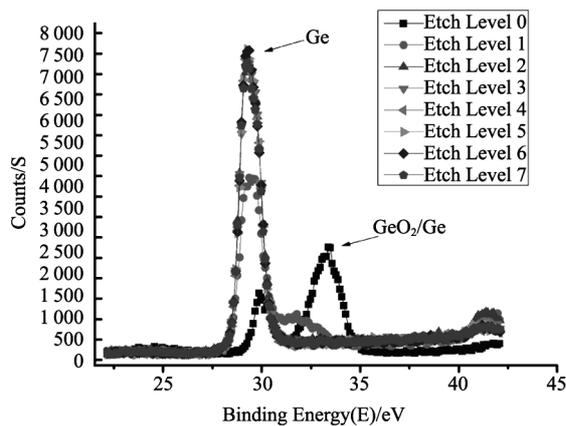


图 16 XPS 分析 GaAs/Ge 电池损伤区域材料
Fig. 16 XPS spectrum of GaAs/Ge solar cells' damaged dot

由 XPS 结果分析可知, GaAs 电池未损伤区域为 TiO_2 及 SiO_2 抗反射膜, 刻蚀层数增加, 材料成分比例并不变化. GaAs 电池损伤区域 Ge 成分变化如下, 表层含有极少量 GeO_2 及大量 Ge 单质, 底层为单质 Ge, 可见在高能量密度脉冲激光作用下 Ge 溅射出来, 极少量瞬间被氧化. XPS 一直没有探测到 Ga、As 元素成分, 这是因为 1 064 nm 被 Ge 吸收, Ge 温度瞬间升高, 并使溅射出来, 冲破 GaAs 层. 把 GaAs 覆盖在溅射物的下方. 对比研究, 与单晶 Si 电池的损伤类似, 1 064 nm 被材料 Si 本征吸收, 最初的损伤区域发生在单晶 Si 电池表面^[11].

4 损伤机理分析

4.1 激光光斑聚焦在电池栅线上

当激光光斑聚焦在电池栅线时, 电池更易损伤,

激光热熔栅线, 使得栅线和半导体材料之间的欧姆接触面增大, 而在电池表面和电极金属接触区域存在很高的复合, 当接触面积增大, 载流子表面复合几率增大^[11], 导致电池输出电流减小, 随着激光能量增加, 栅线熔断, 不能输运载流子, 输出电流减小. 同时, 激光损伤区域内部缺陷增多, 也使电池并联电阻减小, 电池开路电压减小. 激光辐照单晶硅电池栅线时, 如图 3 所示, 短路电流变化在小幅度内 (0.5 J/cm^2) 没有规律变化, 这是因为小能量, 小光斑激光辐照电池的区域相对整个电池而言很小, 对电池输出影响小幅度变化. 如图 8 所示, 单晶硅电池的最大输出功率成下降趋势. 如图 5 所示, 激光辐照 GaAs/Ge 电池栅线, 一个激光能量密度为 60 J/cm^2 脉冲辐照后, GaAs/Ge 电池已经损伤, 这是因为, 激光辐照区域产生缺陷, 电池并联电阻减小, 开路电压下降. 两个脉冲辐照后, 电池失效, 这是因为高强度 1064 nm 激光最先被金属栅线和 Ge 材料吸收, 高温又使得 GaAs 瞬间分解, As 升华, 栅线及 Ge 熔化流动再凝固, 高掺杂锗导通电池正负极, 造成电池短路所致. 图 10 所示, 电池的最大输出功率最后基本降为零.

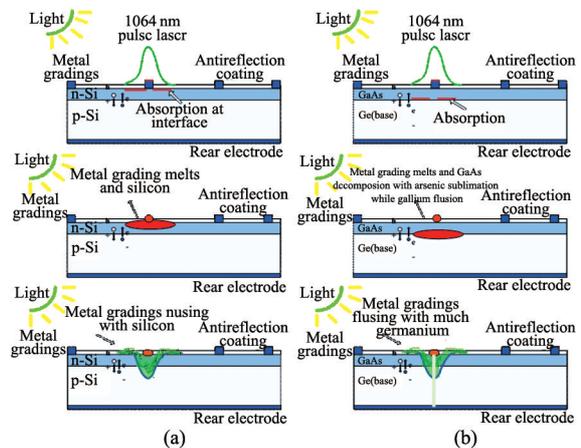


图 17 激光损伤电池栅线示意图 (a) 单晶硅, (b) GaAs/Ge

Fig. 17 Schematic diagram of pulsed laser induced solar cells' gridlines (a) Monocrystalline silicon, (b) GaAs/Ge

4.2 激光光斑聚焦在电池栅线之间

对于激光光斑没有聚焦到栅线上的损伤情况, 小能量激光辐照区域, 表面出现热熔、流动再凝固的热损伤形貌. 而对于强激光损伤区域, 激光损伤区域是热熔、烧蚀、气化、喷溅, 纳秒脉冲激光主要是能量沉积效应造成的热损伤^[12]. 1 064 nm 纳秒激光对样品表面的损伤最先出现损伤形貌的能量密度为单晶

硅 8.1 J/cm^2 , 单结 GaAs/Ge 3.0 J/cm^2 .

对于单晶 Si 电池, 1064 nm 激光在其响应波段内, 电池材料以本征吸收为主, 强激光作用下也有双光子吸收、碰撞电离, 纳秒脉冲激光对材料的损伤主要是激光热和力效应共同作用的结果, 双光子吸收系数很小, 热效应使材料熔化、气化, 材料气化产生的冲击力主要沿着激光传输的方向, 垂直于材料表面, 最终造成损伤^[13]. 对异质结 GaAs/Ge 电池, GaAs 层对 1064 nm 透明, 厚 Ge 基底对 1064 nm 则有很强的吸收, 激光能量沉积, 材料温度瞬间升高以致熔化气化, 强大的冲击力使得 Ge 喷溅出来, 电池的损伤是从 PN 结开始的.

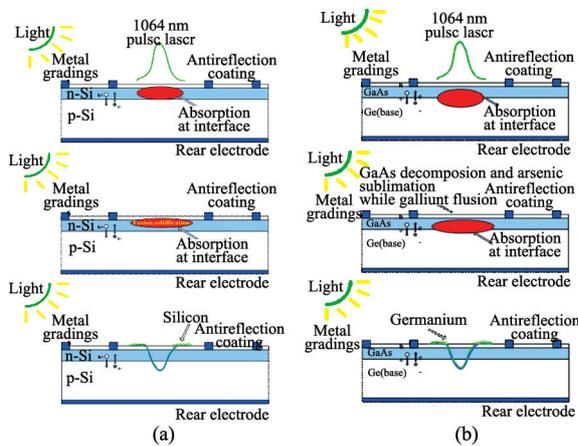


图 18 激光损伤电池表面示意图 (a) 单晶硅, (b) GaAs/Ge

Fig. 18 Schematic diagram of pulsed laser induced solar cells' surface. (a) Monocrystalline silicon, (b) GaAs/Ge

5 结论

1064 nm 纳秒脉冲激光辐照太阳能电池的损伤分为两个方面, 当激光光斑聚焦在金属栅线上时, 电池更易损伤, 此时电池的损伤来自于金属电极的热熔. 激光光斑未聚焦在栅线上时, 电池的破坏归根于激光对光学材料的热和力共同作用, 强激光使得电池材料热熔, 材料熔化气化造成的强大的冲量使其溅射出来. SEM 电镜扫描图片以及 EDS 分析显示, 单晶硅损伤区域的材料仍然是硅, 而单结异质结 GaAs/Ge 损伤区域被 Ge 覆盖, 高掺杂的锗基底导电率较高, 造成 PN 结不能正常发挥作用, 而导致电池输出性能的下降, 通过 COMSOL 计算模拟得到激光能量密度完全可以使材料分解热熔. X 射线光电

子能谱仪等分析结果最终验证了实验结果.

References

- [1] Garg A, Kapoor A, Tripath K N. Laser-induced damaged studies in GaAs[J]. *Optics & Laser technology*, 2003, **35**: 21-24.
- [2] Ma B, Ma H P, Jiao H F, *et al.* Laser-damaged growth characteristics of fused silica under 1064 nm and 532 nm laser irradiation[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(11): 116106-1-116106-8.
- [3] Wang X, Shen Z H, Lu J, *et al.* Laser-induced damaged threshold of silicon in millisecond, nanosecond and picosecond regimes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**: 033103-1-033103-7.
- [4] ZHU Zhi-Wu, CHENG Xian-Gai, WANG Dong. *et al.* Damaged and its mechanism to the visible wavelength filter irradiated by femtosecond laser [J]. *J. Infrared millim. Waves.* (朱志武, 程湘爱, 王东, 等. 多波长飞秒激光损伤可见光滤光片的实验及机理. *红外与毫米波学报*) 2012, **31**(4): 330-335.
- [5] LIU An-Ping, HAN Wei-Feng, HUANG Mao. *et al.* Microstructure and resisting laser damaged property of ZrO_2 films [J]. *J. Infrared millim. Waves.* (刘安平, 韩伟峰, 黄茂, 等. ZrO_2 薄膜微结构及其抗激光损伤特性研究. *红外与毫米波学报*) 2010, **29**(5): 333-336.
- [6] Gabor A M, Ralli M, Montminy S, *et al.* Soldering induced damage to thin Si solar cells and detection of cracked cells in modules[C]. *Presented at the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2006.
- [7] Poulain G, Blanc D, Focsa A, *et al.* Characterization of laser-induced damage in silicon solar cells during selective ablation processes [J]. *Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials*, 2013, **178**: 682-685.
- [8] Natoli J Y, Gallais L, Akhouayri H, *et al.* Laser-induced damaged of materials in bulk, thin-films, and liquid forms [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(16): 3156-3166.
- [9] Thorstensen J. Laser Processing for thin and highly efficient silicon solar cells [D]. Department of Physics Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo, 2013.
- [10] Soong K, Byer R L, McGuinness C, *et al.* Experimental determination of damage threshold characteristics of IR compatible optical materials [C]. *Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference*, 2011.
- [11] XIONG shao-Zhen, ZHU Mei-Fang. *Foundation and Application of Solar Cells*. Beijing: Science Press. (熊绍珍, 朱美芳. *太阳能电池基础与应用* [M]. 北京: 科学出版社, 2009)
- [12] Stuart B C, Feit M D, Herman S, *et al.* Nanosecond-to-femtosecond laser-induced break down in dielectrics [J]. *Physical Review B*. 1996, **53**(4): 1749-1761.
- [13] SUN Cheng-Wei, LU Qi-Sheng, FAN Xiu-Zheng, *et al.* Irradiation Effects of Laser [M]. Beijing: National defence of technology Press. 2002 (孙承伟, 陆启生, 范正修等. *激光辐照效应*. 北京: 国防工业出版社, 2002)