三结太阳电池栅线对激光辐照中的传热影响研究

周广龙[1],徐建明[2],陆 健[1],李广济[1],张宏超[1]

(1. 南京理工大学 理学院,江苏 南京 210094; 2. 上海空间电源研究所,上海 200245)

摘 要:为了研究三结太阳电池表面的栅线在1 070 nm 连续激光辐照过程中的传热影响机制,文中通过激光辐照过程中三结太阳电池实时的电致发光现象分析三结太阳电池的损伤情况,并建立三维锗基太阳电池模型,借助有限元分析软件 COMSOL 对连续激光辐照锗基太阳电池的温度分布进行仿真。结果表明:在连续激光功率密度为 72.5 W/cm^2、辐照时间为 41 s 时,三结太阳电池的顶电池出现轻微损伤,损伤区域首先沿着栅线分布。在锗基太阳电池的仿真模型中,电池的温度升高至 1 318 K,栅线引起了三结太阳电池热量传递方向的各项异性,沿着栅线具有更高的热传导速率。仿真结果能够对实验现象给予合理的解释。

关键词:连续激光; 三结太阳电池; 栅线; 热效应

中图分类号:TN249 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.1220001

Heat transfer influence on grid lines of triple-junction solar cell irradiated by laser

Zhou Guanglong[1], Xu Jianming[2], Lu Jian[1], Li Guangji[1], Zhang Hongchao[1]

(1. College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200245, China)

Abstract: Effects of heat transfer on grid lines of triple-junction solar cell irradiated by 1 070 nm CW laser were studied through the damage on triple-junction solar cell irradiated by laser with electroluminescence test. Three-dimensional model based on germanium solar cell was constructed with finite element analysis software COMSOL to simulate temperature distribution on triple-junction solar cell irradiated by CW laser. The results indicate that the top-cell of triple-junction solar cell is slightly damaged at the laser power density 72.5 W/cm^2 and continuous irradiation time 41 s and the damaged region is firstly distributed along the grid line. The temperature of germanium solar cell in the simulation model has increased to 1 318 K and the grid lines which has high heat conduction rate result in the anisotropic heat transfer direction. The experimental results are well explained by the simulation model.

Key words: CW laser; triple-junction solar cell; grid lines; heat effect

收稿日期:2018-07-05; **修订日期**:2018-08-03

基金项目:上海航天科技创新基金(SAST20161113)

作者简介:周广龙(1993-),男,硕士生,主要从事激光与物质相关作用方面的研究。Email:424437445@qq.com

导师简介:张宏超(1979-),男,讲师,硕士生导师,博士,主要从事激光与物质相关作用方面的研究。Email:hongchao@njust.edu.cn

0 引 言

三结太阳电池具有光电转换效率高、温度系数小、抗辐射能力强等特点,广泛应用于空间能源系统[1]。从 20 世纪末,国内外就开始致力于激光辐照太阳电池的研究,R.K.Jain 等人利用脉冲激光研究了硅太阳电池和砷化镓太阳电池的光电性能[2]。S Roensch 等人通过电致发光测试, 利用电致发光与量子效率的光谱关系得到三结砷化镓电池每个子电池的 I-V 曲线, 并在不同的光谱辐照条件下得到电池的暗电流特性和光照特性[3]。朱荣臻等人研究了纳秒激光对单晶 Si、单结 GaAs 太阳电池的激光损伤特性[4],郑勇等人利用电子和质子辐照三结砷化镓电池 GaInP/GaAs/Ge,通过测试 PL 发光强度来判断电池损伤情况[5]。目前对太阳电池激光损伤的研究,主要以研究单晶硅、单结和双结砷化镓太阳电池为主。对激光辐照太阳电池的栅线热效应机理研究却未见报道。因此, 开展在激光辐照中三结太阳电池栅线的传热影响的机理研究有着重要的意义。

文中开展了 1 070 nm 连续激光辐照三结太阳电池时栅线对电池传热影响的研究, 通过观察激光辐照过程中的实时电致发光图像, 对比激光辐照前后的电致发光测试图像,并建立有限元仿真模型,分析了栅线在激光辐照中的损伤和传热效应, 并对实验结果进行了解释。

1 实 验

1.1 三结太阳电池简介

实验样品是 $Ga_{0.5}In_{0.5}P$/GaAs/Ge 三结太阳电池,采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术制备,禁带宽度分别为 1.85、1.42、0.65 eV, 对应的响应光谱范围分别为 300~670、500~920、800~1 800 nm, 电池尺寸为 30 mm×40 mm,电池结构、电池部分参数如图1 所示。

当太阳光照射在电池表面时,半导体内的原子中束缚态的电子受到能量大于其禁带宽度的光子激发,释放电子,留下一个空穴,形成电子空穴对。栅线直接和顶电池 n 型区接触,电子在内建电场作用下被驱向 n 型区并由栅线收集,当外接电阻形成回路时,则有电流流经 PN 结,内部电流的方向是 N 区→P 区。

Front contact		
n^+-GaAs	AR coating	
n-AlInP window	0.03 μm	2×10^{18} cm^{-3}
n-GaInP emitter	0.1 μm	2×10^{18} cm^{-3}
P-GaInP base	0.5 μm	2×10^{17} cm^{-3}
P^+-GaInP BSF	0.05 μm	2×10^{18} cm^{-3}
P^{++}-GaAs	0.015 μm	5×10^{19} cm^{-3}
n^{++}-GaAs	0.015 μm	1×10^{19} cm^{-3}
n-GaInP window	0.1 μm	1×10^{18} cm^{-3}
n-GaAs emitter	0.1 μm	1×10^{18} cm^{-3}
p-GaAs base	3.0 μm	2×10^{17} cm^{-3}
p-GaAs BSF	0.07 μm	5×10^{18} cm^{-3}
P^{++}-GaAs	0.015 μm	5×10^{19} cm^{-3}
n^{++}-GaAs	0.015 μm	5×10^{19} cm^{-3}
n^+-GaInP window	0.05 μm	1×10^{18} cm^{-3}
n^+-Ge emitter		
p-Ge substract		
Back contact		

图 1 三结太阳电池结构示意图

Fig.1 Structural diagram of triple-junction solar cell

1.2 三结太阳电池激光损伤实验装置

实验系统主要包括连续光纤激光器、CCD 和源表,如图 2 所示。连续光纤激光器输出的激光经反射镜,直接辐照在三结太阳电池样品上。其中,光纤连续激光器输出波长为 1 070 nm,单模输出,最大输出功率 200 W,光斑直径为 7 mm,输出功率连续可调。源表提供 2.5 V 的激发电压,并实时记录三结太阳电池的输出电流。CCD 实时拍摄三结太阳电池的电致发光图像, 反射镜对 1 070 nm 波长的反射率为 99.8%。室内温度为 25 ℃。

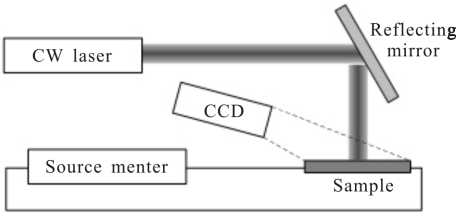

图 2 激光辐照太阳电池光路图

Fig.2 Beam path of solar cell under laser irradiation

1.3 实验结果分析

文中利用电致发光现象来研究三结太阳电池的顶电池在激光辐照过程中的的损伤情况。电致发光是三结太阳电池在一定的偏压下, 电流激发过剩载流子复合,从而发射光子的过程,主要用于高效多结太阳电池隐性缺陷检测[6]。正向偏压下三结太阳电池顶电池发出的光为肉眼可见的红光。

实验中, 通过观察三结太阳电池在激光辐照过程中的实时电致发光测试图像, 发现在激光功率密

度为 72.5 W/cm²、辐照时间为 41 s 时,三结太阳电池的顶电池出现损伤，激光辐照后的电致发光测试图像如图 3 所示,电池表面有两处黑色区域。三结太阳电池的输出电流随时间的变化曲线如图 4 所示,从图 4 中可以得出,当激光辐照时,电流迅速上升,激光停止辐照后,电流从最大值迅速降低。

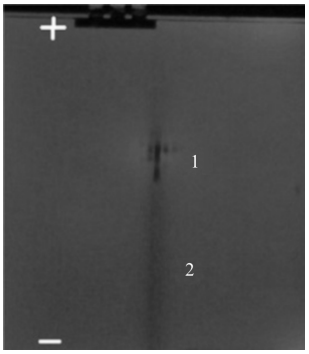

图 3 激光辐照后三结太阳电池的 EL 测试图像

Fig.3 EL image of triple-junction solar cell irradiated by laser

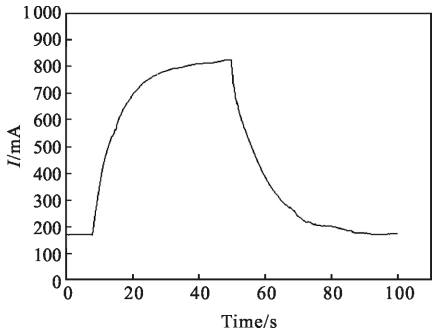

图 4 三结太阳电池的输出电流随激光辐照时间的变化曲线

Fig.4 Curve of the output current of triple-junction solar cell with the time of laser irradiation

在图 3 中,电池顶端为焊接的上电极,下电极在电池的背面,如图中标记所示。当有光照射电池时,太阳电池光生电流方向是从上电极经电池传输至下电极。从图 3 可以得出,在激光光斑辐照处存在沿着电池栅线方向的黑色区域 1，在激光光斑与电池底部之间,存在沿着栅线方向的一个长条状的黑色区域 2。

栅线的导热系数相对较高，当激光辐照在三结太阳电池上时，栅线作为金属可以将激光辐照产生的热量从高温区域传递至低温区域，在热量传递的过程中栅线的温度升高。当激光功率比较大、辐照时间比较长时,电池受激光辐照产生的热量更多,在热量传递过程中栅线温度更高，由于栅线直接和太阳电池的顶电池接触，温度较高的栅线对顶电池会造成一定的损伤。由于三结太阳电池的短路电流由顶电池 $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ 限制[7],顶电池受到损伤,便影响到三结太阳电池的短路电流，导致三结太阳电池的电性能发生变化。

顶电池和中电池透过 1 070 nm 激光，底电池本征吸收 1 070 nm 激光，被吸收的光子的能量中大于锗禁带宽度的部分，传递给晶格使底电池本身温度升高,热量由中电池和顶电池传递至表面。电池表面由栅线和减反射膜组成,栅线的主要成分是银,减反射膜由二氧化钛和氧化铝组成。银、二氧化钛和氧化铝的导热系数分别为 429、1.809~10.3、35 W/m/K,可以得出银的导热能力高于二氧化钛和氧化铝，并且减反射膜对 1 070 nm 的激光有较高的透过率，栅线本身受到激光辐照温度也稍有增加，所以激光辐照三结太阳电池产生的热量主要由栅线传递，导致栅线的温度高于减反射膜的温度。当温度足够高时,由于栅线直接和顶电池接触,顶电池出现损伤,损伤的区域沿着栅线分布。损伤区域量子效率降低,载流子复合变弱,电致发光显示为黑色。由于在激光辐照处电池的温度最高,所以区域 1 处损伤最严重。

在损伤区域 2 处,由于电池在激光辐照过程中始终处于正向偏压下,电池初始的传导电流为 171 mA。当激光开始辐照时，三结太阳电池的底电池吸收 1 070 nm 的激光,电池输出光电流。光电流沿着传导电流的方向输出到源表，总电流从 171 mA 上升至 823 mA,如图 4 所示。在激光损伤区域 1 处的下方出现损伤区域,上方未出现明显损伤,这是由于电流传输的单向性和额外的电流热效应，在原有的温度基础上，导致激光光斑与负电极之间出现沿着栅线方向的长条状损伤区域。

2 数值仿真与分析

利用有限元仿真软件 COMSOL 计算连续激光辐照三结太阳电池的温升情况和温度分布情况。常温下,1 070 nm 波长的光对应于底电池的吸收波段,中电池与顶电池不吸收。三结太阳电池衬底锗的厚度为 0.1 mm，顶电池与中电池的总厚度不足 4 μm，几乎不影响热量的传递，所以文中对三结太阳电池的模型进行了简化，即建立锗基单结太阳电池的三

维模型，在锗衬底上布置栅线和减反射膜。栅线为银,减反射膜由二氧化钛和氧化铝组成。

2.1 数值仿真模型

利用有限元分析软件建立了锗基单结太阳电池的三维模型，衬底锗上是栅线银和减反射膜二氧化钛和氧化铝,减反射膜与栅线的宽度比为 10:1,三维模型尺寸为 11 mm×11 mm×0.2 mm，结构示意图如图 5 所示。

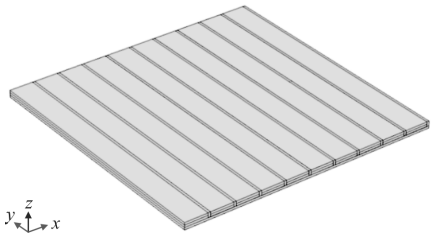

图 5 锗基太阳电池三维模型示意图

Fig.5 Structural schematic diagram of three-dimensional model of solar cell based on Ge

热传导模型：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}=\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(k(x)\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k(y)\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k(z)\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right) \tag{1}$$

式中：T、ρ、C_p、k、t 是衬底的瞬态温度、密度、比热容、导热系数、作用时间。材料的热物理参数如表 1 所示。

表 1 Ag、Ge、Al_2O_3 的热物理参数[8-9]

Tab.1 Thermal physical parameters of Ag,Ge,Al_2O_3

Parameters	Density /kg·m^{-3}	Specific heat capacity /J·kg^{-1}·K^{-1}	Heat conductivity coefficient /W·m^{-1}·K^{-1}	Refractive index	Melting point /K
Ag	10 500	235	429	0.239	1 235
Ge	5 323	310	60	4.42	1 211
Al_2O_3	3 965	730	35	1.65	2 327

连续激光的热源表示为：

$$Q=I_0\cdot(1-R) \tag{2}$$

式中：I_0 和 R 分别是激光功率密度和表面反射率。模型中，激光功率密度为 72.5 W/cm^2，表面反射率为 6.5%,光斑半径为 1 mm。

2.2 仿真结果与分析

图 6 和图 7 是衬底锗表面有栅线时，激光辐照 41 s 的温度分布图。从图 6 可得,经过激光辐照 41 s 后,激光辐照处电池的温度升高至 1 318 K,温度已经高于衬底锗的熔点 1 211 K。但是实验中由于室温保持在 25 ℃,电池的背电极与空气的热对流和源表测试导线等接触物的热传递，仿真模型的温度要高于电池实际温度。

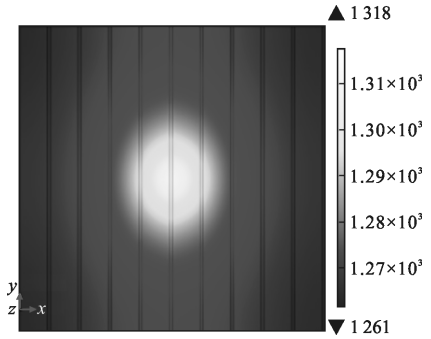

图 6 太阳电池正面温度分布

Fig.6 Temperature distribution on the front of solar cell

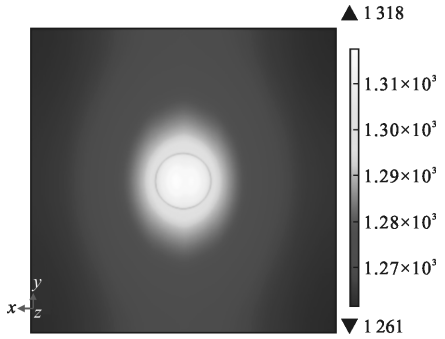

图 7 太阳电池背面温度分布

Fig.7 Temperature distribution on the back of solar cell

图 8 是在其他条件不变的情况下，将栅线更换为减反射膜覆盖在半导体锗上,激光辐照 41 s 的温

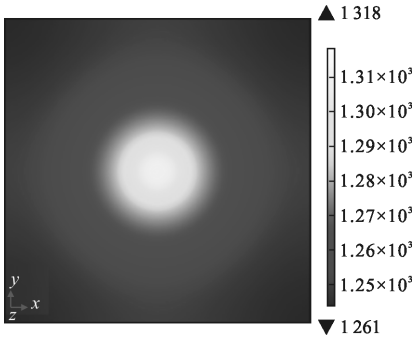

图 8 半导体锗的温度分布

Fig.8 Temperature distribution of semiconductor Ge

度分布图。从图 8 可以得出,没有栅线的半导体锗在相同激光功率密度辐照相同时间下，温度场在激光光斑周围均匀分布。通过对比图 7 和图 8 可以得到，栅线引起了三结太阳电池热量传递方向的各向异性,沿着栅线具有更高的热传导速率。

三维模型的温度场分布验证了在栅线的作用下受到激光辐照的衬底锗温度升高，产生的热量主要沿着栅线传递，导致栅线的温度高于减反射膜的温度，很好地解释了实验中三结太阳电池的顶电池受损区域沿着栅线分布的现象。

3 结 论

通过半导体锗和锗基太阳电池的温度分布仿真计算，连续激光辐照锗基三结太阳电池产生的热量在金属栅线的作用下，引起了三结太阳电池热量传递方向的各向异性，沿着栅线具有更高的热传导速率,导致栅线的温度高于减反射膜的温度,激光辐照对锗基三结太阳电池顶电池的损伤区域首先沿着栅线方向分布。当激光功率密度为 72.5 W/cm^2、辐照时间为 41 s 时,三结太阳电池的顶电池出现损伤。文中的实验和仿真结果对激光毁伤太阳能电池提供一定的参考依据。

参考文献:

[1] Zhang Zhongwei, Lu Jianfeng, Chi Weiying, et al. Technique development and prospects analysis of GaAs solar cell [J]. ***Aerospace Shanghai***, 2003, 20(3): 33-38. (in Chinese)
张忠卫, 陆剑峰, 池卫英, 等. 砷化镓太阳电池技术的进展与前景[J]. 上海航天, 2003, 20(3): 33-38.

[2] Raj K Jain. Calculated performance of Indium Phosphide solar cells under monochromatic illumination [J]. ***IEEE Transactions on Electron Devices***, 1993, 40(10): 1893-1895.

[3] Roensch S, Hoheisel R, Dimroth F, et al. Subcell IV characteristic analysis of GaInP/GaInAs/Ge solar cells using electroluminescence measurements [J]. ***Applied Physics Letters***, 2011, 98(25): 251113.

[4] Zhu Rongzhen, Wang Rui, Jiang Tian, et al. Research of laser irradiation effect on monocrystalline silicon solar cells and single junction GaAs solar cells [J]. ***J Infrared Millim Waves***, 2015, 34(4): 479-485. (in Chinese)
朱荣臻, 王睿, 江天, 等. 单晶 Si、单结 GaAs 太阳能电池的激光损伤特性对比研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(4): 479-485.

[5] Zheng Y, Yi T C, Wang J L, et al. Radiation damage analysis of individual subcells for GaInP/GaAs/Ge solar cells using photoluminescence measurements [J]. ***Chinese Physics Letters***, 2017, 34(2): 026101.

[6] Lu Weiming, Li Sheng, 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)
鲁伟明, 李省, 张付特, 等. 基于不同电压下的电致发光和红外成像的太阳能电池缺陷检测 [J]. 发光学报, 2014, 35 (12): 1511-1519.

[7] Shanghai Institute of Space Power-Sources. Physical Power Technology [M]. Beijing: Science Press, 2015: 2-3, 45-51, 135-140. (in Chinese)
上海空间电源研究所编著.物理电源技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 2-3, 45-51, 135-140.

[8] Ding Weihuan, Zhang Liang, Shen Zhonghua, et al. Analyse on the thermal interaction of the long pulse high power laser and semiconductor[J]. ***Infrared & Laser Engineering***, 2007, 36(S1): 332-335. (in Chinese)
丁玮环, 张梁, 沈中华, 等. 长脉冲高能激光与半导体材料的热作用分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36 (S1): 332-335.

[9] Lee K H, Shin W S, Kang E C. Analysis of optical damage in germanium induced by a continuous wave laser [J]. ***Applied Optics***, 2013, 52(10): 2055-2061.