

# 高温导致三结太阳能电池电致发光谱变化

任攀 吴凌远 王伟平 刘国栋\*

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

**摘要** 高温下半导体材料性能会发生变化,影响太阳能电池光电转换效率。为了了解 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池在聚光和高温条件下的工作性质,研究了热加载后的三结太阳能电池样品在定压下的电致发光谱,发现受热后 GaInP 顶电池和 GaAs 中电池的电致发光谱的强度发生变化,出现峰值反转的现象。结合光照下伏-安特性、暗伏安特性及外量子效率分析了这种现象产生的原因,即加热过程在 GaInP 顶电池中引入晶格结构缺陷,导致其电致发光强度变弱,同时顶电池并联电阻变小, GaAs 中电池分压有所增加,发光增强,整个样品的电致发光谱出现峰值反转现象。结果表明 GaAs 中电池比 GaInP 顶电池具有更好的耐热性。

**关键词** 光电子学; 太阳能电池; 热损伤; 电致发光; 量子效率

**中图分类号** O472 **文献标志码** A **doi**: 10.3788/LOP51.121602

## Change of Electroluminescence Spectra of Solar Cells Caused by Heating

Ren Pan Wu Lingyuan Wang Weiping Liu Guodong

*Institute of Fluid Physics, China Academic Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

**Abstract** The photoelectric characteristics of solar cells can be changed after heated, which ultimately influence the converting efficiency of solar cell. Electroluminescence spectra of GaInP/GaAs/Ge triple junction solar cell under constant voltage are investigated in order to understand the working properties of such cells under concentration and heating condition. It is found that the luminescence peaks of GaInP top cell and GaAs middle cell change and reverse after the solar cells are heated. By considering the current-voltage characteristic and external quantum efficiency, the origin of this phenomenon is found to attribute to the introduction of deep level defects in the crystal. GaAs middle cell is found to be more tolerant to heat-induced damage than GaInP top cell.

**Key words** optoelectronics; solar cells; heat-induced damage; electroluminescence; quantum efficiency

**OCIS codes** 160.2100; 160.5293; 040.6040

### 1 引言

GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池是一种高效的无机太阳能电池,采用晶格匹配但带隙宽度不同的半导体材料构成叠层结构,对太阳光谱各个波段的光子进行充分利用,可以实现较高的光电转换效率<sup>[1]</sup>,在航天等领域有广泛应用<sup>[2]</sup>。以此为代表的 III-V 族光伏器件,也被广泛用于聚光型太阳能电池<sup>[3]</sup>以及激光传能<sup>[4]</sup>的研究中。在高温下太阳能电池性能会发生退化,聚光型太阳能电池在应用中需要特殊的散热系统来减少高温对太阳能电池性能的影响<sup>[5]</sup>,因此了解电池在高温作用后的性能变化很重要。相对单结太阳能电池,叠层结构的电池各个子结没有单独引线,分别评价每个子电池的光电性能变得尤为困难。量子效率测量<sup>[6]</sup>可以分别得到各个子电池的光电转换效率,但是这种手段是基于光偏置和电偏置下光生电流的测量,需要专门的设备且耗时较长。

正向偏压下,P-N 结的 P 区和 N 区会注入非平衡载流子,非平衡少数与多数载流子复合并发出光子,是电致发光(EL)的基本原理<sup>[7]</sup>。光伏器件电致发光现象是光伏现象的逆过程,基于这种现象发展出的电致发

收稿日期: 2014-05-22; 收到修改稿日期: 2014-06-30; 网络出版日期: 2014-11-14

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金(HEL2013-06)、中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金(SFZ20120303)

作者简介: 任攀(1986—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: renpan@caep.cn

\* 通信联系人。E-mail: guodliu@126.com

光成像及光谱扫描技术具有快速、非接触的特点。Rau<sup>[8]</sup>发现了定压条件下电致发光强度和量子效率之间成正比关系,以此为理论基础,太阳电池的电致发光成像可以用于对太阳电池宏观损伤的快速判断,如隐裂、电阻不均、花片、断栅<sup>[4]</sup>等;还可以通过电致发光强度对影响太阳电池效率的各种因素进行分析,并最终对太阳电池的质量和电性能做出综合评价。目前基于电致发光成像及光谱扫描的光伏器件表征技术主要集中在单晶 Si 太阳电池<sup>[9-13]</sup>、有机太阳电池<sup>[14]</sup>、薄膜太阳电池<sup>[15]</sup>等,用于叠层太阳电池器件方面的研究较少。Raymond 等<sup>[16]</sup>通过电致发光谱的强度和外量子效率(EQE)的对应关系判断出 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池各子电池的伏-安特性,对于三结太阳电池各子电池的表征具有重要意义。国内外都有研究者通过电致发光方法研究三结太阳电池在粒子辐照条件下的性能变化,得到了与光诱导电流(LBIC)方法一致的测量结果<sup>[17-18]</sup>,这说明电致发光方法对于光伏器件是一种快捷可靠的表征方法。

本文利用光谱仪对加热后的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池进行电致发光谱测试,并和热损伤前发光谱进行比较,发现了热损伤后样品里 GaInP 顶电池和 GaAs 中电池在定压下的电致发光谱强度发生了反转,针对这个现象结合样品伏-安特性、暗伏安特性、外量子效率测量结果进行了分析。研究可以结果为 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池在聚光和高温条件下的使用和损伤过程提供参考。

## 2 实验与结果

### 2.1 实验材料

实验样品采用中国电子科技集团第 18 研究所研制的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池 4 片,规格为 30 mm×40 mm。

### 2.2 实验方法

样品加热过程为:采用 HGH 公司的 ECN100 型面源黑体将样品加热至 380 °C,持续时间为 90 s。

电致发光谱的测试在暗室中进行,光路图如图 1 所示。采用 TPR3010S 型恒压恒流电源在实验样品两端加载 5 V 正向偏压,同时利用 Andor 公司的 SR750-B1 型光纤成像光谱仪对通电样品的发光进行采集,最后用 Apogee 公司的 U16M 型科学级 CCD 探测器进行测量。整个光谱测量系统在进行测量前用已知波长的光源定标。

采用 Thermo Oriel Instruments 公司的 69920 型太阳模拟器作为光源得到 AM0 光谱,功率密度为 0.2 W/cm<sup>2</sup>,配合 Keithley2601 源表,得到样品在模拟太阳光照下<sup>[19]</sup>的伏-安特性数据。外量子效率的测量采用 Enlitech 公司的 QE-R 型太阳能光谱响应/量子效率测试系统进行,通过施加合适的光偏置和电偏置得到每个子电池的光生电流,计算得到样品外量子效率。

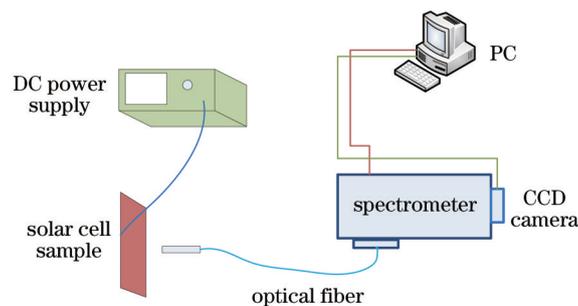


图 1 电致发光信号采集示意图

Fig.1 Diagram of EL spectra signal collecting

### 2.3 实验结果和分析

GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池由三个子电池串联而成。正向偏压条件下三个子电池分别发出与禁带宽度接近的光子。由硅 CCD 对发光谱进行测量得到的典型发光峰如图 2 所示,其中 650 nm 和 890 nm 的发光峰分别来自于 GaInP 顶电池和 GaAs 中电池。而 Ge 底电池的发光峰在 1800 nm 附近,超出了硅 CCD 探测器的响应范围。

由图 2 可以看出,加热前太阳电池样品的电致发光以 GaInP 顶电池为主,发光峰位于 650 nm 附近,相比之下 890 nm 附近 GaAs 中电池的发光强度要弱很多,仅为 GaInP 发光峰值的 10%。而经过热处理之后,样品

GaInP 顶电池发光强度急剧降低, 峰值高度仅为热处理前的 5%; 相应的 GaAs 中电池的发光强度有所增加, 达到了热处理前的 3.5 倍, 且发光强度超过 GaInP 顶电池, 出现了强度反转的现象。

为了分析峰值反转现象出现的原因, 对热损伤前后太阳电池的外量子效率进行了测量, 结果如图 3 所示。其中, GaInP 顶电池和 Ge 底电池的外量子效率相比初始状态发生了明显退化, 分别下降了 13% 和 9%; 相比之下 GaAs 中电池退化不明显, 只下降了 2%。可见造成 GaInP 顶电池 650 nm 谱线发光强度大幅下降的原因, 在于加热过程对 GaInP 顶电池造成了损伤。在高温下, GaInP 材料中引入的晶体结构缺陷, 加速了剩余载流子的复合, 从而降低了顶电池的光电转换效率, 以及电致发光过程中的电光转换效率<sup>[8]</sup>。

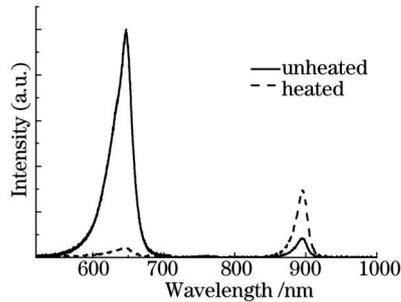


图2 太阳电池样品受热前后 EL 谱的变化

Fig.2 EL spectra of solar cell before and after heating

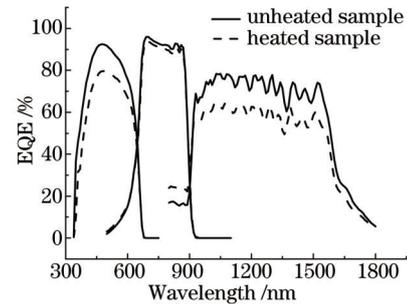


图3 热损伤前后太阳电池的外量子效率变化

Fig.3 External quantum efficiency of solar cell before and after heating

顶电池外量子效率下降是 650 nm 发光峰减小的原因, 但是不能解释中电池发光峰(890 nm)强度变大的现象, 这需要结合热损伤前后样品的伏-安特性曲线变化进行分析。样品在 AM0 光谱辐照下测得的伏-安特性对比如图 4 所示, 图中样品的电压、电流参数和输出特性在表 1 中列出。其中,  $I_{sc}$  是短路电流,  $V_{oc}$  是开路电压,  $F$  是填充因子,  $E$  是光电转换效率。可以看到热损伤后太阳电池样品的输出特性有明显退化, 电池效率由热损伤前 27.2% 下降到热损伤后 10.6%; 同时填充因子有明显下降, 由 0.835 下降至 0.345。开路电压下降了 0.21 V, 短路电流却出现了小幅增大, 并最终导致漏电流增大。伏-安特性曲线的这种变化是太阳电池并联电阻变小造成的<sup>[20-21]</sup>, 考虑到样品表面普遍出现电致发光谱的变化, 可以推断加热过程在太阳电池中引入了晶格结构缺陷, 导致并联电阻的变小和漏电流的增大。结合图 2 的外量子效率谱判断伏-安特性的变化主要是由顶电池和底电池造成的, 加热过程对中电池产生的损伤效果不明显。

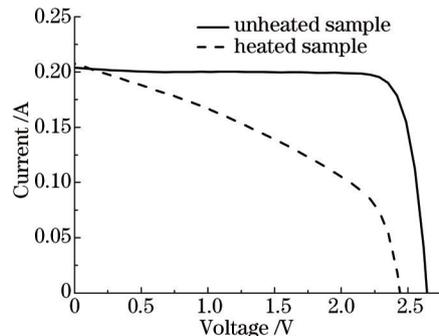


图4 加热前后样品伏-安特性变化

Fig.4 Current-Voltage characteristics before and after heating

表1 太阳电池热损伤前后输出特性对比

Table 1 Comparison of solar cell output characteristics

	$I_{sc}$ / A	$V_{oc}$ / V	$F$	$E$ / %
Unheated sample	0.203	2.64	0.835	27.2
Heated sample	0.208	2.43	0.345	10.6

图 5 所示的是样品暗伏-安特性, 即电致发光过程中的伏-安特性。从图中可以看出, 在特定电压下, 相比未加热的太阳电池样品, 热损伤后的样品电流值有所增大。可见热处理后的样品总电阻存在变小的现象。

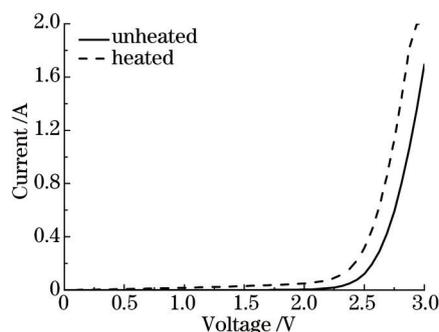


图5 热损伤前后太阳能电池暗伏-安特性对比

Fig.5 Comparison of dark current-voltage characteristics before and after heating

综合上述实验结果,可以对峰值反转现象出现的原因做如下分析:加热作用下,顶电池和底电池有明显退化,内部杂质缺陷增多,在材料禁带中引入了大量晶格结构缺陷;晶格结构缺陷的存在作为载流子复合中心,加速载流子的复合,从而减小顶电池和底电池的并联电阻。另一方面由于载流子复合过程主要以非辐射复合为主,顶电池电致发光变弱。在恒定的偏压下,顶电池和底电池电阻变小,中电池电阻变化较小,分压变大,导致中电池电致发光强度增加。

### 3 结 论

发现了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池在高温损伤前后的电致发光谱的峰值反转现象,并结合量子效率、伏-安特性以及暗伏-安特性测量结果,对峰值反转现象的成因进行了分析。结果表明,热损伤过程在样品内部引入了晶格结构缺陷,形成非辐射复合中心,加速载流子复合,导致样品光电转换效率以及电致发光效率的下降,并减小了子电池的并联电阻。此外,还发现在 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池中,GaAs 中电池的耐热性能优于其他两结子电池,对于三结电池在高温环境下的使用具有一定参考意义。

**致谢:**感谢中国工程物理研究院流体物理研究所程和平老师在光谱测量方面给予的热情帮助,感谢中国电子科技集团第 18 研究所提供的太阳能电池样品。

### 参 考 文 献

- 1 J F Geisz, D J Friedman, J S Ward, *et al.*. 40.8% efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(12): 123505.
- 2 Masafumi Yamaguchi, Tatsuya Takamoto, Kenji Araki, *et al.*. Multi-junction III-V solar cells: current status and future potential[J]. *Solar Energy*, 2005, 79(1): 78-85.
- 3 Wang Wenbo, Li Ming, Ji Xu, *et al.*. Investigation of the output characteristics of GaAs solar cell based on fresnel concentrating system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0716003.  
王文博, 李明, 季旭, 等. 菲涅耳聚光系统下砷化镓电池输出特性研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0716003.
- 4 He Tao, Yang Suhui, Zhang Haiyang, *et al.*. Experiment of space laser energy transmission and conversion with high efficiency[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0317001.  
何滔, 杨苏辉, 张海洋, 等. 高效激光无线能量传输及转换实验[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0317001.
- 5 Yuan Aiyi, Wang Liangxing. Research and prospect of concentrating photovoltaics generation technology[J]. *Shanghai Electric Power*, 2009, (1): 13-18.  
袁爱谊, 王亮兴. 聚光光伏发电技术研究与展望[J]. *上海电力*, 2009, (1): 13-18.
- 6 Thomas Kirchartz, Anke Helbig, Wilfried Reetz, *et al.*. Reciprocity between electroluminescence and quantum efficiency used for the characterization of silicon solar cells[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2009, 17(6): 394-402.
- 7 Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng. *The Physics of Semiconductors*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. 297-302.  
刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. *半导体物理学*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011. 297-302.
- 8 Uwe Rau. Reciprocity relation between photovoltaic quantum efficiency and electroluminescent emission of solar cells

- [J]. *Physical Review B*, 2007, 76(8): 085303.
- 9 Xiao Jiao, Xu Lin. Electroluminescence images and I-V characteristic analysis of defective crystalline silicon solar cells [J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2011, (3): 15-18.  
肖 娇, 徐 林. 太阳能电池缺陷 EL 检测及电性能分析[J]. *上海计量测试*, 2011, (3): 15-18.
- 10 Wang Xuemeng, Ye Zirui, Shen Hui, *et al.*. Defect detection and classification evaluation system for crystalline silicon solar cells[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 031602.  
王学孟, 叶子锐, 沈 辉, 等. 晶体硅太阳能电池缺陷检测与分类评价体系[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 031602.
- 11 Wang Chao, Jiang Xiaoyu, Liu Xiaohui. Defect detection in crystalline silicon solar cells based on electroluminescence imaging[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(9): 1332-1336.  
王 超, 蒋晓瑜, 柳效辉. 基于电致发光成像理论的硅太阳能电池缺陷检测[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(9): 1332-1336.
- 12 Ma Xinjian, Lin Tao. Analysis of mono-crystalline silicon solar cells electroluminescence defects and process influencing factors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 031601.  
马新尖, 林 涛. 单晶硅太阳能电池电致发光缺陷及工艺影响因素分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 031601.
- 13 Du Ming Tsai, Shih Chieh Wu, Wei Chen Li. Defect detection of solar cells in electroluminescence images using Fourier image reconstruction[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 99: 250-262.
- 14 Marco Seeland, Roland Rösch, Burhan Muhsin, *et al.*. Electroluminescence as characterization tool for polymer solar cells and modules[J]. *Energy Procedia*, 2012, 31: 167-172.
- 15 Thomas Kirchartz, Uwe Rau. Electroluminescence analysis of high efficiency Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(10): 104510.
- 16 Raymond Hoheisel, Frank Dimroth, Andreas W Bett, *et al.*. Electroluminescence analysis of irradiated GaInP/GaInAs/Ge space solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, 108: 235-240.
- 17 M Zazoui, J C Bourgoin. Space degradation of multijunction solar cells: An electroluminescence study[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(23): 4455-4457.
- 18 Niu Zhenhong, Guo Qi, Ren Diyuan, *et al.*. The use of electroluminescence to study the radiation effects of multi-junction solar cell[J]. *Research & Progress of SSE*, 2008, 28(1): 1-3.  
牛振红, 郭 旗, 任迪远, 等. 多结太阳能电池辐射损伤的电致发光研究[J]. *固体电子学研究与进展*, 2008, 28(1): 1-3.
- 19 Su Shi, Zhang Guoyu, Fu Yun, *et al.*. New development of solar simulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 070003.  
苏 拾, 张国玉, 付 芸, 等. 太阳模拟器的新发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 070003.
- 20 Martin A Green. *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*[M]. Di Dawei, Cao Zhaoyang Li Xiuwen, *et al.* Transl. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2009. 60-62.  
马丁·格林. 太阳能电池: 工作原理、技术和系统应用[M]. 狄大卫, 曹昭阳, 李秀文, 等译. 上海: 上海交通大学出版社, 2009. 60-62.
- 21 Xiong Shaozhen, Zhu Meifang. *Foundation and Applications of Solar Cells*[M]. Beijing: Science Press, 2009. 103-109.  
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. 103-109.