

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201710147

# 太阳能电池开路电压非接触定量成像检测

刘俊岩<sup>1</sup>, 萧博成<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨顺迈中学, 哈尔滨 150525)

**摘要:** 太阳能电池的开路电压( $V_{oc}$ )是影响太阳能电池的光电转化效率重要参数之一. 为了准确检测太阳能电池开路电压图像, 首先利用有限元仿真方法得到了太阳能电池开路电压与发光成像强度之间的关系; 其次基于调制光致载流子锁相成像(LIC)系统对商用单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池进行了开路电压非接触定量成像研究, 并与光致发光成像检测方法(PL)对比; 最后利用LIC方法对不同剂量1 MeV电子辐照GaAs太阳能电池进行开路电压成像研究. 结果表明: LIC方法和PL方法均能获得太阳能电池的开路电压分布, 且两种方法所测得的单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池开路电压均值均与Sun- $V_{oc}$ 方法所测结果一致, 误差小于1%. 利用LIC方法测得开路电压分布结果与PL检测方法吻合, 相比PL检测方法, LIC检测结果信噪比更高, 且检测过程更简单; 对不同剂量1 MeV电子辐照的GaAs电池的开路电压进行LIC成像的结果与电测结果吻合, 为分析辐照电池局部损伤提供了一种新方法.

**关键词:** 开路电压; 太阳能电池; 成像; 载流子锁相成像检测; 电子辐照

**中图分类号:** TN24      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2018)10-0162-06

## Contactless and quantitative imaging of open-circuit voltage of solar cells

LIU Junyan<sup>1</sup>, XIAO Bocheng<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;  
2. Harbin Shunmai High School, Harbin 150525, China)

**Abstract:** The open-circuit voltage of a solar cell is one of the key parameters for conversion efficiency. In order to contactlessly and quantitatively image the open-circuit voltage of solar cells, in this paper, the relationship between the luminescence intensity and the open-circuit voltage ( $V_{oc}$ ) of solar cells was firstly simulated by finite element technique (FEM). Secondly, the  $V_{oc}$  images of a crystalline silicon (c-Si) solar cell and a multicrystalline silicon (mc-Si) solar cell were quantitatively investigated by lock-in carrierography (LIC) as well as the existed photoluminescence (PL) method. In order to validate the imaging method, Sun- $V_{oc}$  was employed to measure the open-circuit voltage of the crystalline silicon (c-Si) solar cell and the multicrystalline silicon (mc-Si) solar cell. Finally, the open voltage images of GaAs solar cells irradiated by 1 MeV electrons with different fluences were studied by LIC. The result shows: the averaged  $V_{oc}$  values by both imaging methods were in good agreements with the results measured by Sun- $V_{oc}$ , and the average values of LIC and PL for two kinds of solar cells differed less than 1% compared with Sun- $V_{oc}$ . Furthermore, the  $V_{oc}$  image by LIC was consistent with PL. Compared to PL measurements, LIC has a higher signal-to-noise-ratio (SNR) as well as a simpler detection process. The  $V_{oc}$  degradation of electron irradiation GaAs solar cells measured by LIC was in a good agreement with electrical measurement. Therefore, LIC could provide a possible approach to achieve more quantitative characterization of spatially resolved information and a new method to investigate the irradiated solar cell for space use.

**Keywords:** open-circuit voltage; solar cell; imaging; lock-in carrierography; electron irradiation

太阳能电池的开路电压( $V_{oc}$ )作为其电性能表征重要基本参数, 直接影响电池光电转化效率. 目前常规检测 $V_{oc}$ 的测量方法主要有 $I-V$ 曲线<sup>[1]</sup>和Sun- $V_{oc}$ <sup>[2]</sup>, 该类方法检测迅速, 可以得到电池的整体参

数, 但对于局部信息很难得到. 由于电池材料本身以及复杂的制作过程、使用过程中退化(民用电池的雨、雪特别是冰、雹等天气<sup>[3]</sup>、空间太阳能电池的复杂辐照环境<sup>[4]</sup>)均可能对电池载流子密度分布产生影响, 影响开路电压分布. 因此, 发展快速检测开路电压分布的方法具有重要意义.

近年来, 由于发光成像检测方法(包括电致发光<sup>[5]</sup>和光致发光<sup>[6]</sup>)具有快速、准确且能够获得局部参数分布的优势得到了快速发展. 电致发光(EL)方法虽检测设备简单, 但是向电池内部注入电流需

收稿日期: 2017-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(61571153); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51521003); 机器人技术与系统国家重点实验室开放课题基金和高等学校学科引智计划(B07108)

作者简介: 刘俊岩(1978-), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 萧博成, 5824434@qq.com

要相应的电极及设备, 因此只能对完整电池进行检测。

光致发光方法 (PL) 利用直流超带隙光对样件进行光注入, 受电池结构限制较少, 得到越来越多的学者关注. 目前该方法已经成功对串联电阻<sup>[7]</sup>、反向饱和电流<sup>[8]</sup>等参数分布进行了研究. 但是该方法在对电池电参数分布定量研究时, 需要消除电池回路中残余载流子复合发光强度的影响. 光致载流子锁相发光成像 (LIC)<sup>[9-11]</sup> 结合了锁相方法和 PL 方法被成功应用于电池电参数定量检测; Liu 等<sup>[12]</sup> 通过测量不同负载的发光图像利用拟合方式得到了开路电压等电参数的分布. 由于需要前期建立复杂的物理模型, 且拟合需要不同工作点处的图像, 效率较低, 限制了工程应用。

本文将通过有限元仿真手段得到发光强度与电压之间的定量关系, 该模型简单明了, 利用该模型可实现开路电压检测迅速、为工程化应用提供一种新的方法. 首先仿真得到了发光光强与电压之间的关系, 其次利用 LIC 方法直接对商业单晶硅电池和多晶硅电池的开路电压成像进行定量研究, 并与 PL 和 Sun- $V_{oc}$  结果对比验证该方法在检测开路电压面参数的正确性, 最后为了进一步扩大该技术的应用, 利用 LIC 方法对 1 MeV 电子不同注量辐照 GaAs 电池进行开路电压成像检测研究。

### 1 开路电压与发光光强仿真分析

本文采用 Griddler 2.5<sup>[13]</sup> 二维有限元软件对商业单晶硅 (同样可适用于多晶硅电池和 GaAs 电池) 进行开路电压和发光光强进行仿真, 其仿真模型如图 1 所示。

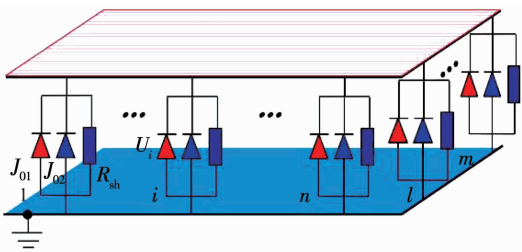


图 1 太阳能电池开路状态等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of solar cell at open circuit condition

电池面积  $S$ 、串联电阻  $R_s$ 、并联电导  $1/R_{sh}$  及暗饱和电流  $J_{01}$ 、 $J_{02}$  等仿真参数见表 1. 由于本文只对开路电压进行研究, 串联电阻和并联电阻对开路电压影响很小, 可忽略. 因此在仿真中将其设置为理论值。

图 2 给出了表 1 参数下仿真的  $I-V$  曲线、 $P-V$  曲线以及电参数和光电转化效率. 该结果与目前商业

单晶硅电池检测结果基本吻合。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Parameters in simulation

基本参数	$S/$ $\text{mm}^2$	$J_{01}/$ $(\text{fA} \cdot \text{cm}^{-2})$	$J_{02}/$ $(\text{nA} \cdot \text{cm}^{-2})$	$(1/R_{sh})/$ $(1 \cdot \Omega \text{cm}^{-2})$
数值	125 × 125	800	60	0

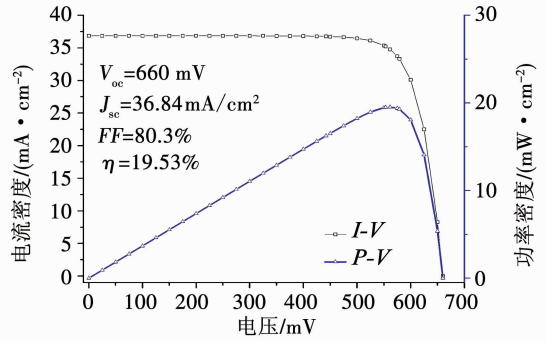


图 2 仿真得到的  $I-V$  及  $P-V$  曲线

Fig. 2  $I-V$  and  $P-V$  curves for the whole cell by simulation

为了研究太阳能电池发光光强与电压之间关系, 本文通过仿真不同光强 (0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 sun) 得到开路电压分布以及 PL 光强分布图, 如图 3 所示. 图 3(a) 给出了 1.0 sun 下开路电压分布图, 图 3(b) 给出了 1.0 sun 下 PL 强度图分布. 通过改变不同光强可以得到不同开路电压与发光强度的关系, 选取图 3(a) 中的一个像素点 A 进行研究, 得到电压与发光光强关系如图 3(c) 所示。

由图 3(c) 可以看出随着开路电压增加, 发光光强成指数增长. 利用下式:

$$\Phi = \Phi_0 + c \exp(aU),$$

进行拟合, 可以得到如图 3(c) 所示的数值. 其中  $a = 38.215$ , 恰好与热电压的倒数  $U_T = kT/q$  (常温下为 0.026 V,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $q$  电荷电量,  $T$  为温度) 接近, 并且方程在形式上与文献 [7] 报道的太阳能电池在像素点  $i$  的发光强度  $\Phi_i$  满足下式一致:

$$\Phi_i = C_i \exp(U_i/U_T) + S_i.$$

式中:  $C_i$  为校正系数, 包含了载流子复合特性以及样件和检测设备的光学特性;  $U_i$  为局部电压;  $U_T$  为热电压;  $S_i$  为电池回路中残余载流子复合发光强度, 为一常数. 目前, PL 检测方法通过测量相应光强下短路电流的发光图像消除  $S_i$  以及背景噪声的影响. 本文采用的 LIC 检测方法结合了锁相方法和 PL 方法, 在检测过程中已经将直流项  $S_i$  的影响消除, 达到快速检测的目的。

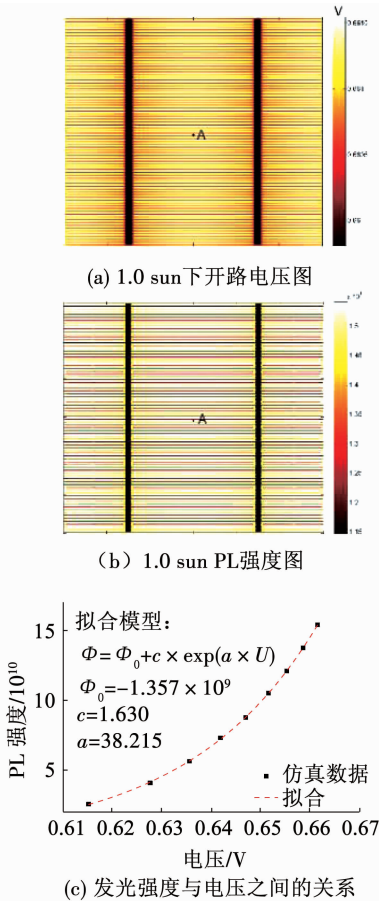


图 3 仿真结果

Fig. 3 Simulation results

本文采用两路相关算法如下式所示:

$$S_i^{0^\circ} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[ \Phi_{i,k} 2\sin\left(\frac{2\pi(k-1)}{N}\right) \right], N \geq 4;$$

$$S_i^{90^\circ} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[ \Phi_{i,k} 2\cos\left(\frac{2\pi(k-1)}{N}\right) \right], N \geq 4.$$

式中:  $S_i^{0^\circ}$ 、 $S_i^{90^\circ}$  分别为同步信号和正交信号;  $N$  为一锁相周期内所采集的图像数量, 通过锁相算法可以得到发光的幅值, 即

$$A_i = \sqrt{(S_i^{0^\circ})^2 + (S_i^{90^\circ})^2}.$$

因此  $\Phi_i = C_i \exp(U_i/U_T) + S_i$  变为

$$U_i = U_T \ln(A_i/C_i).$$

## 2 试验过程

锁相发光成像试验系统如图 4 所示. 系统中所采用激光器为 45 W/808 nm 光纤激光器, 激光通过工程散射片扩束到样件表面. 近红外相机 (Bobcat-640-GigE, 响应波长为 0.9 ~ 1.7  $\mu\text{m}$ , 全窗口像素为 640 × 512, 曝光时间为 25 ms) 用来采集图像, 相机前放置长通滤波片 (LP1000) 防止反射激光进入相机造成干扰. 通过自主研发的软件使数据采集卡 (NI 6259) 控制近红外相机采集图像和激光器进行

直流输出 (PL 模式) 或调制输出 (LIC 模式), 调制输出时调制周期为 0.1 s, 远高于电池载流子寿命, 在该调制周期下假设调制周期对载流子发光信号没有影响<sup>[14]</sup>, LIC 检测时间均为 32 s. 所有实验均在室温暗室下进行.

分别对商业单晶硅 (c-Si) 太阳能电池 (面积为 12.5 cm × 12.5 cm, 效率为 17.8%) 和多晶硅太阳能 (mc-Si) 电池 (面积为 15.6 cm × 15.6 cm 效率为 18.6%) 分别进行 PL- $V_{oc}$ 、LIC- $V_{oc}$  和 Sun- $V_{oc}$  检测. 其次对 GaAs 单结电池 (面积为 2.0 cm × 1.5 cm) 的未辐照电池、能量 1 MeV, 注量分别为  $3 \times 10^{14}$ 、 $5 \times 10^{14}$ 、 $1 \times 10^{15} \text{ e}^-/\text{cm}^2$  的电子辐照电池进行 LIC 检测研究.

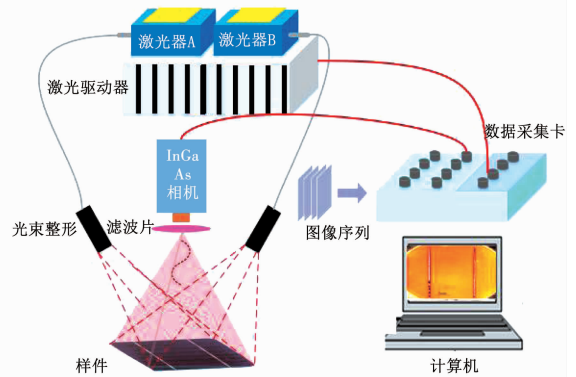


图 4 试验装置

Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up

在成像检测中, 首先在激光强度为 0.2 sun 下开路状态进行检测, 求出校正系数  $C_i$ , 然后在 1.0 sun 下开路状态进行检测, 最终获得开路电压的面分布. 在两个不同光照条件下, PL 方法需要测量电池短路状态发光图像消除回路中残余载流子复合发光强度  $S_i$  的影响, 因此 PL 方法检测时间将为 LIC 方法检测时间的两倍.

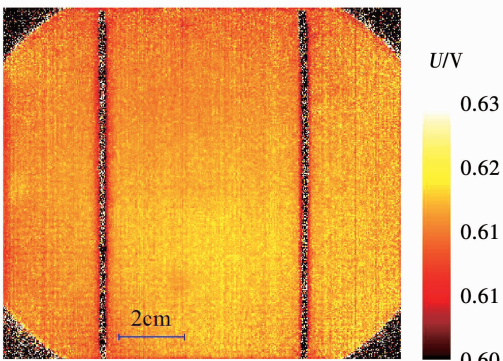
## 3 结果及分析

### 3.1 晶体硅太阳能电池开路电压成像

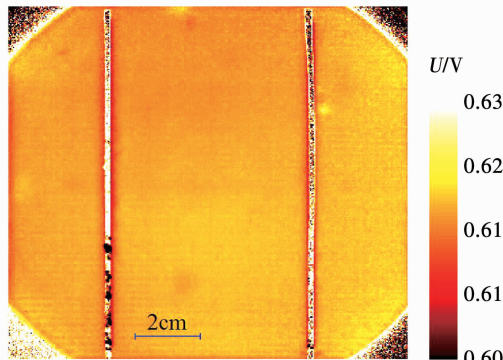
图 5 分别给出了 PL 和 LIC 方法得到的单晶硅电池开路电压图像以及像素分布统计图. 图 5(a) 为 PL- $V_{oc}$  图像、图 5(b) 为 LIC- $V_{oc}$  图像, 忽略汇流栅 (负极) 和背景的影响, 两种方法获得的开路电压分布具有很好的一致性, 但是相比较 PL- $V_{oc}$  图像, LIC- $V_{oc}$  图像具有更高的信噪比. 因此 LIC 采用锁相方法在检测过程中具有抑制噪声、提高信噪比的功能. 图 5(c) 统计了两种方法开路电压值的像素分布. 由图 5(c) 可以再次看出, 两种方法的峰值吻合, 且像素统计满足正态分布, 但 LIC 获得的开路电压图像

的方差要小于 PL 方法, 因此, LIC 方法获得开路电压数据分布比 PL 方法获得的像素分布更集中, 这与锁相方法抑制噪声有关。

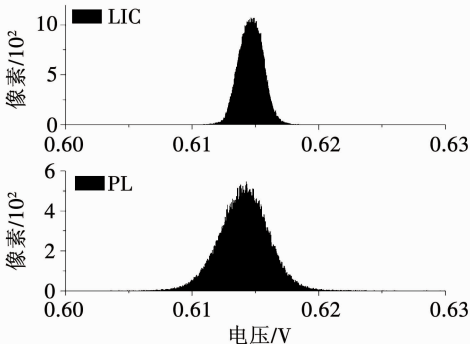
两种方法均能看出多晶硅材料晶粒与晶粒之间开路电压分布的不均匀性, 并且能分辨栅线、电极、裂纹和缺口等区域。由图 6(c) 可以看出两种方法获得开路电压面分布的像素统计, 同样 LIC 方法像素分布更集中, 并且更能体现出多晶硅由于材料本身特性所决定的不均匀性的特性。对比图 5(c)、图 6(c) 可以看出, 单晶硅电池由于材料本身的均匀性, 像素统计成正态分布, 而多晶硅由于本身含有多个晶粒, 其像素统计具有不同峰值。



(a) PL测得单晶硅电池开路电压



(b) LIC测得单晶硅电池开路电压图

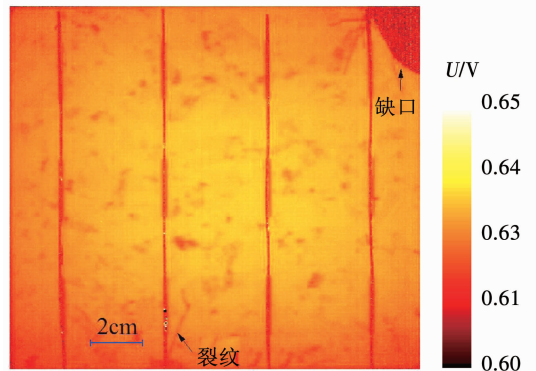


(c)  $V_{oc}$  图像像素分布

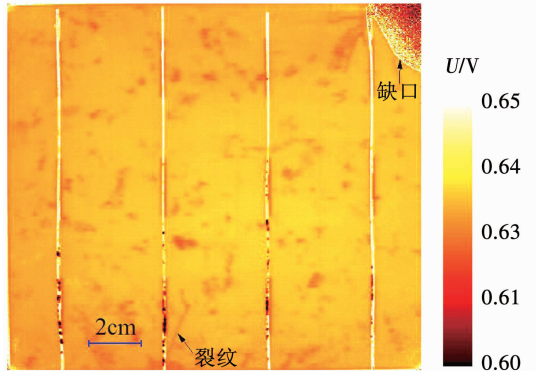
图 5 单晶硅太阳能电池的开路电压

Fig. 5  $V_{oc}$  of the c-Si solar cell

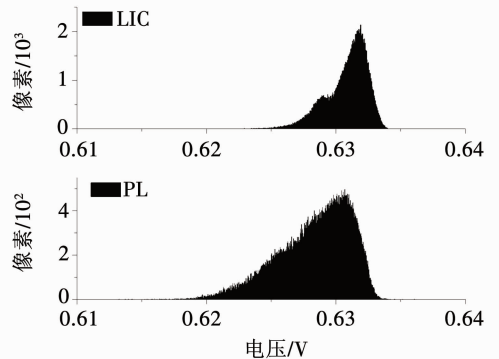
图 6 给出了 PL 和 LIC 方法得到的多晶硅电池开路电压图像。为了验证两种方法的准确性, 本文利用 Sun- $V_{oc}$  对两种电池进行测量, 并与 PL- $V_{oc}$  图像和 LIC- $V_{oc}$  图像算数平均值对比, 结果见表 2。



(a) PL测得多晶硅电池开路电压图



(b) LIC测得多晶硅电池开路电压图



(c)  $V_{oc}$  图像像素分布

图 6 多晶硅太阳能电池的开路电压

Fig. 6  $V_{oc}$  of the mc-Si solar cell

表 2 不同方法测得开路电压对比

Tab. 2 Measurements of  $V_{oc}$  by different methods

检测方法	Sun- $V_{oc}$ /V	PL- $V_{oc}$ /V	LIC- $V_{oc}$ /V
单晶硅电池	0.610 5	0.614 1	0.614 6
多晶硅电池	0.630 7	0.628 4	0.630 8

由表 2 可以看出, 无论是单晶硅电池还是多晶硅电池, 3 种方法所获得的开路电压结果吻合。将

$Sun-V_{oc}$  的结果作为标准值,测量单晶硅电池时 PL 方法相差 0.59%,LIC 方法相差 0.67%;测量多晶硅电池时 PL 方法相差 3.6%,LIC 方法相差 0.16%。但是 PL- $V_{oc}$ 、LIC- $V_{oc}$  两种方法相对于  $Sun-V_{oc}$  均能获得开路电压的面分布,同时 LIC 方法所获得开路电压图像分布要比 PL 方法分布更集中,同时信噪比更高,另外 PL 方法在校正时需要在不同光强下减掉短路电流图像,而 LIC 方法为自校正方法,无需短路电流图像,检测更方便。

### 3.2 GaAs 太阳电池开路电压成像

图 7 给出了 GaAs 电池的 LIC 开路电压成像结果。

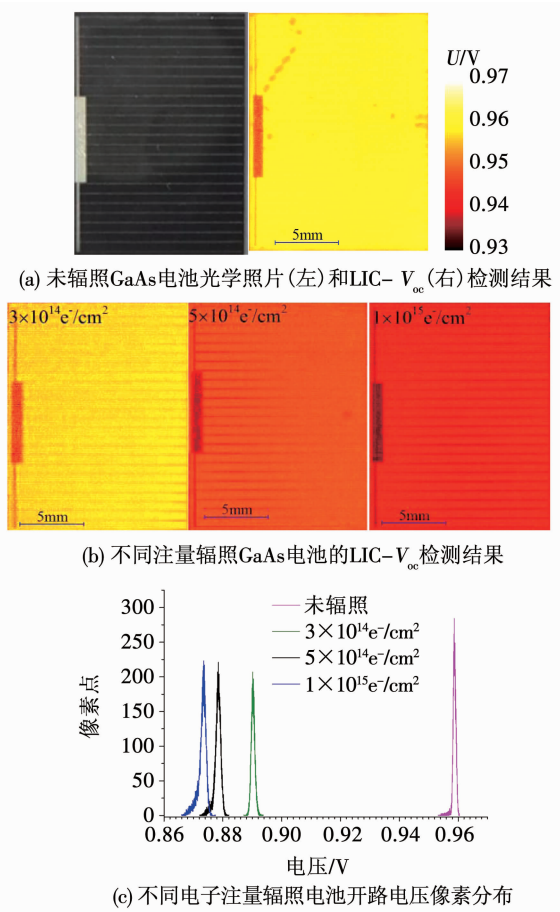


图 7 GaAs 电池的开路电压

Fig. 7 Information for  $V_{oc}$  of GaAs solar cells

由图 7(a),可以看出 GaAs 的 LIC- $V_{oc}$  图像可以得到光学图像不能看到的缺陷以及分布不均匀性,这种不均匀性直接会影响电参数变化.因此对太阳能电池进行成像具有重要的实用价值.图 7(b)给出了不同注量电子辐照后的 GaAs 电池开路电压分布结果(标尺与图 7(a)相同),由该图可以看出随着注量的增加,开路电压整体分布数值降低,这是由于电子辐照电池会引入复合中心,降低载流子寿命,因

此造成开路电压降低,由于本文采用的是 1 MeV 能量的电子,可以完全将 GaAs 电池整个厚度击穿<sup>[15]</sup>,可以近似认为 GaAs 电池载流寿命在纵向是均匀的.图 7(c)给出了不同注量下电子辐照电池的开路电压像素分布情况,电池未辐照时,开路电压整体数值高于辐照电池与成像结果一致,但是其峰值高于辐照电池,因此其像素分布更均匀,而经过电子辐照后,像素分布更分散,为分析辐照电池提供了一种有效的检测方法。

图 8 为电子辐照 GaAs 电池开路电压分布平均值、最大值以及最小值随注量变化的趋势,并与电测结果进行了对比.由图 8 可知,无论是电测结果还是 LIC 测量结果,随着注量的增加,开路电压降低,并且 LIC 结果与电测结果基本吻合,验证了该方法在检测辐照电池的可行性,同时为检测辐照电池局部辐照损伤提供一种新方法.由于该方法为非接触光学成像方法,对新型太阳能电池特别是检测难度较大的有机太阳能电池提供了新途径。

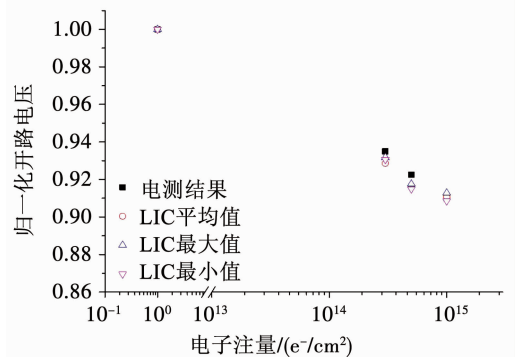


图 8 不同注量电子辐照 GaAs 电池的开路电压衰减

Fig. 8  $V_{oc}$  degradation of GaAs solar cells at different electron fluences

## 4 结 论

1) 利用有限元仿真方法得到了太阳能电池发光强度与电压之间的关系。

2) 光致发光(PL)方法和锁相调制光致载流子锁相成像(LIC)分别对单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池所得到的开路电压成像结果吻合且与  $Sun-V_{oc}$  结果相差小于 1%。但 LIC- $V_{oc}$  只需要两幅图像,不需要短路电流时的发光图像,操作更为简单,且图像信噪比均比 PL- $V_{oc}$  高,具有在线定量检测面参数的潜在优势。

3) 利用 LIC 方法对电子辐照 GaAs 电池进行开路电压成像研究,检测结果与电测结果吻合,为检测辐照损伤电池提供一种新方法。

## 参考文献

- [1] MORGAN M J, JAKOVIDIS G, MCLEOD I. An experiment to measure the I-V characteristics of a silicon solar cell [J]. *Physics Education*, 1994, 29(4): 252. DOI: 10.1088/0031-9120/29/4/014
- [2] SINTON R A, CUEVAS A. Contactless determination of current-voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 69(17): 2510. DOI: 10.1063/1.117723
- [3] BHOOPATHY R, KUNZ O, JUHL M, et al. Outdoor photoluminescence imaging of photovoltaic modules with sunlight excitation [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2018, 26(1): 69. DOI: 10.1002/pip.2946
- [4] TEX D M, NAKAMURA T, IMAIZUMI M, et al. Direct evaluation of influence of electron damage on the subcell performance in triple-junction solar cells using photoluminescence decays [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1985. DOI: 10.1038/s41598-017-02141-0
- [5] FUYUKI T, KONDO H, YAMAZAKI T, et al. Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86: 262108. DOI: 10.1063/1.1978979
- [6] TRUPKE T, BARDOS R A, SCHUBERT M C, et al. Photoluminescence imaging of silicon wafers [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(4): 044107. DOI: 10.1063/1.2234747
- [7] TRUPKE T, PINK E, BARDOS R A, et al. Spatially resolved series resistance of silicon solar cells obtained from luminescence imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 90(9): 093506. DOI: 10.1063/1.2709630
- [8] GLATTHAAR M, HAUNSCHILD J, KASEMANN M, et al. Spatially resolved determination of dark saturation current and series resistance of silicon solar cells [J]. *Physica Status Solidi Rapid Research Letter*, 2010, 4(1/2): 13. DOI: 10.1002/psr.200903290
- [9] SUN Qiming, MELNIKOV A, MANDELIS A. Quantitative self-calibrating lock-in carrierographic lifetime imaging of silicon wafers [J]. *Applied Physics Letter*, 2012, 101(24): 242107. DOI: 10.1063/1.4772207
- [10] SONG Peng, LIU Junyan, OLIULLAH M, et al. Series resistance imaging of silicon solar cells by lock-in photoluminescence [J]. *Physica Status Solidi Rapid Research Letter*, 2017, 11(7): 1700153. DOI: 10.1002/psr.201700153
- [11] HU Lilei, LIU Mengxia, MANDELIS A, et al. Colloidal quantum dot solar cell electrical parameter non-destructive quantitative imaging using high-frequency heterodyne lock-in carrierography and photocarrier radiometry [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 174: 405. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.09.020
- [12] LIU Junyan, MELNIKOV A, MANDELIS A. Silicon solar cell electrical parameter measurements through quantitative lock-in carrierographic (photoluminescence) and thermographic imaging [J]. *Physica Status Solidi A*, 2013, 210(10): 2135. DOI: 10.1002/pssa.201329206
- [13] WONG J. Griddler: intelligent computer aided design of complex solar cell metallization patterns [C]//Proceedings of the 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Tampa, FL: IEEE Press, 2014: 0933. DOI: 10.1109/PVSC.2013.6744296
- [14] GIESECKE J A, MICHI B, SCHUBERT M C, et al. Minority carrier lifetime in silicon wafers from quasi-steady-state photoluminescence [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(7): 1979. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.02.023
- [15] LIU Junyan, SONG Peng, WANG Fei, et al. Photocarrier radiometry for noncontact evaluation of space monocrystalline silicon solar cell under low-energy electron irradiation [J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(9): 097801. DOI: 10.1088/1674-1056/24/9/097801

(编辑 张红)