

文章编号: 1000-7032(2013)08-4028-07

## 基于电致发光成像的太阳能电池缺陷检测

陈文志, 张凤燕\*, 张 然, 李 超

(厦门大学 能源研究院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 为了检测太阳能电池存在的缺陷, 给太阳能电池施加一定的正向偏压, 利用 CCD 相机在暗室中探测电池的发光。探测分别在 3 种状态下进行: 无滤光探测、过滤 800 nm 以下波长后探测和过滤 800 nm 以上波长后探测。研究发现: 只有在过滤 800 nm 以下波长的镜片下探测效果最好, 表明电池主要发红外光, 其波长范围为 850 ~ 1 200 nm。控制光探测器的探测时间, 发现不同探测时间下电池的发光强度不同, 探测时间相同但偏压不同则光强也不同。该方法可以检测出正向偏压下电池存在的各种缺陷类型。在反向电压下, 薄膜电池会出现小光点, 这表示缺陷区域和密度, 研究证明薄膜电池也能发红外光且薄膜中存在区域缺陷。对低功率的电池片进行光探测发现, 电池存在严重缺陷。上述结果表明, 红外光探测可以直观、快速、方便地检测太阳能电池存在的缺陷。

**关 键 词:** 电致发光; 太阳能电池; 红外发光; 探测

中图分类号: TN383+.1

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20133408.1028

## Defect Detection of Solar Cells Based on Electroluminescence Imaging

CHEN Wen-zhi<sup>1</sup>, ZHANG Feng-yan<sup>1\*</sup>, ZHANG Ran<sup>1</sup>, LI Chao<sup>1</sup>

(School of Energy Research, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

\* Corresponding Author, E-mail: fengyanzhang@xmu.edu.cn

**Abstract:** In order to detect the hidden defects of the solar cells, the electroluminescence image was obtained by applying a certain forward bias voltage to solar cell in the darkroom using the light sensor CCD camera. The experiments were carried out at three states: without optical filter, filtering the wavelength less than 800 nm, and filtering the wavelength greater than 800 nm. It is found that the detection effect is the best only under the lens of filtration of less than 800 nm wavelength. It proves that the cell mainly emits infrared light of 850 ~ 1 200 nm. By controlling the detecting time, it is found that the light intensity is varied with the detection time, and also varied with the forward bias voltage in the same detection time. This method can detect all kinds of hidden defect type of the solar cells. Under the reverse voltage, thin film cell appears small spots which show defect area and density, and the studies prove that thin film cell also can send infrared light and the defects exist in the cell. In detecting low power cell, it is found that there are serious defects in the cell. The results show that infrared detection has rapid and convenient intuitive features for solar cells defect detection.

**Key words:** electroluminescence; solar cell; infrared light; detect

收稿日期: 2013-04-18; 修订日期: 2013-05-31

基金项目: 福建省教育厅科研项目(985)资助项目

作者简介: 陈文志(1983-), 男, 福建漳州人, 主要从事太阳能电池方面的研究。

E-mail: chenwenzhi12345@163.com, Tel: (0592) 5952797

## 1 引言

目前,以煤、石油、天然气为代表的传统能源已日渐枯竭,寻找新的能源成为各国关注的焦点。调整能源结构、大力发展新能源产业是当今世界发展的必然趋势<sup>[1]</sup>。太阳能作为21世纪洁净可再生能源逐渐得到广泛应用。由于受经济危机的影响,太阳能的发展受到一定限制,特别是进入2012年,太阳能发展出现疲软,很多小企业因为资金压力和补贴减少而倒闭,而且人们对于太阳能电池的质量也提出一些质疑,如何提高电池及组件的质量就成为厂家关注的问题。人的肉眼很难辨认电池存在的隐性缺陷,如何能够及时有效地在工业生产过程中检测出太阳能电池的缺陷,尽快找出造成该缺陷的工艺原因,是太阳能电池产业发展的一个关键问题<sup>[2]</sup>。太阳电池在其从原料制作成品的过程中,除了材料本身的缺陷外还会出现许多工艺缺陷,而光致发光检测方法则是检测工艺缺陷的最佳选择<sup>[3]</sup>。电池的缺陷检测也可以通过电致发光(Electro luminescence, EL)的技术进行成像检测,这种检测方法具有直观、方便、简单的优点,已成为太阳电池检测的重要手段<sup>[4]</sup>。而电感生电流<sup>[5]</sup>和红外热成像(DLIT)<sup>[6]</sup>的检测方法并不形成直观的图像,还需要进行深入判断。

太阳能电池是半导体性质的二极管,从理论上讲它和发光LED二极管一样,在一定偏压下会因电池中载流子的辐射复合而发出一定波长的光,而且其发光强度应该是随着偏压在一定范围内的不断增加而变大。在正向偏压作用下,电致发光强度直接反应了少数载流子浓度和少子的扩散长度。如果电池中的个别区域发光强度较弱,就说明该区域内存在某种缺陷。在正向偏压下,如果电池中的载流子复合大多数以热量形式发射,则说明电池存在内缺陷,此时缺陷处发光强度较弱;而如果偏压小甚至未能达到偏压要求,此时发光强度也弱,这是电池的外缺陷造成的。在反向偏压下,特别是在接近反向击穿电压时,由于电池缺陷处的预击穿导致碰撞离化,电子和空穴复合也会向外发射光子,所以在反向偏压下产生的电致发光现象也能直接反映电池的内在缺陷分布情况。本文将主要介绍电致发光技术的滤光设计及其在电池检测中的缺陷研究,通过在太阳能电

池正负极两端施加正向和反向偏置电压,并通过光探测器CCD相机进行探测测试,通过控制不同条件研究电池的性能和分析电池缺陷。

## 2 检测原理及实验系统

现在的太阳能电池以晶体硅为主流,虽然市场上还有染料敏化材料、纳米材料及薄膜等其他种类的太阳能电池<sup>[7]</sup>,但所有电池都具有相同的性质——二极管特性。

当给二极管加上正向电压后,从p区注入到n区的空穴和由n区注入到p区的电子在pn结附近数微米内分别与n区的电子和p区的空穴复合,产生自发辐射的荧光。对于不同的半导体材料,电子和空穴所处的能量状态不同,电子和空穴复合时释放出的能量也不同,释放出的能量越多,则发出的光的波长越短。太阳能电池具有二极管的性质,因此在通正向电压之后,太阳能电池就能发出一定波长的光。利用特制的光探测相机进行拍摄,就可以得到相应的成像图。电池缺陷的存在会导致电池少子寿命的减小,即扩散长度减少,这样电流密度就相应减弱,电池发光强度减小,缺陷就显示出来<sup>[8-9]</sup>。

图1是太阳能电池电致发光的成像检测装置示意图。实验在暗箱中进行,CCD相机、镜头及滤光片组成一个探测系统。其中相机是型号为QHY8L的600万像素的相机,检测波长范围为200~1200nm。滤光片可以被安装到镜头上,镜头与相机相连接。被检测的太阳能电池板或电池片被放置在导电良好的底座上,直流稳压电源与太阳能电池正负极相连接。制冷式CCD相机被安装在暗箱上方,相机通过数据线与电脑相连接,实现数据传输。电脑中有测试软件,通过测试软件实现相机的拍摄和时间的控制。给电池片或组件通以恒定电流时,电池片或组件发出红外光,同

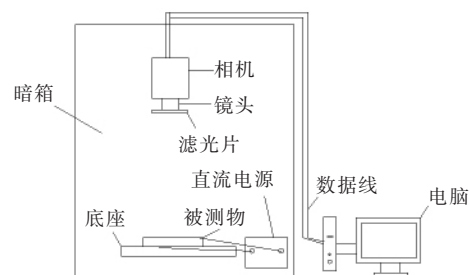


图1 检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the detection system

时操作计算机使相机工作并进行探测,最后在计算机上显示图像。

本文在不同滤光条件下对电池片进行了测试,对测试结果进行了分析比较,同时通过测试硅电池和薄膜电池研究了不同条件下的测试效果。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 滤光片的设计及结果

系统测试在暗室中进行,分为3种状况:无滤光、在镜头上安装过滤800 nm以下波长的滤光片和镜头上安装过滤800 nm以上波长的滤光片。测试结果图2所示。电池在加上一定的正向偏压后发出红外光,通过CCD摄相机可以探测得到相应的显示图片<sup>[10]</sup>。通过调整给电池施加正向偏压+1.5 V,这时恒定电流为6.7 A,通过调整电源的供给电压可以得到通过电池的电流密度,即通过电池发光亮度的高低来判断。图2(a)为无滤光下的测试结果,可以看出图片亮度较高,而且图片中出现了模糊不清的大面积白片甚至全白现象,这主要是暗箱中漏光导致图像采集过程中受到外界光线干扰较大造成的。图2(b)为过滤800 nm以下波长的滤光片的测试结果,研究发现该图片拍摄效果较好,清晰度高,适合于肉眼直观判断。而图2(c)则显示了一片黑暗,原因是电池发出的光被滤光片过滤,未能被相机芯片采集到,说明电池的发光主要为红外光。

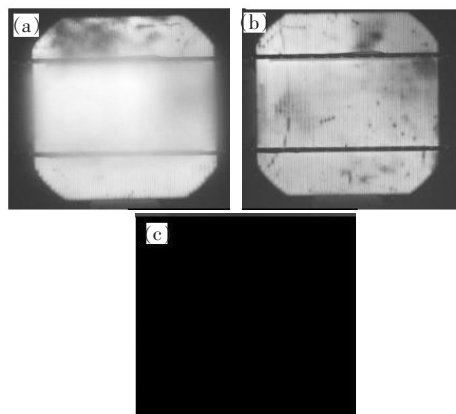


图2 不同滤光片下的检测结果。(a) 无滤光;(b) 过滤800 nm以下的光;(c) 过滤800 nm以上的光。

Fig. 2 The test results with different filter. (a) Without filter. (b) With filter under 800 nm. (c) With filter upon 800 nm.

#### 3.2 不同条件下的成像效果

按照图1的实验系统连接好线路,使用同一个电源、同一个单晶电池片,比较不同电流、不同CCD采集时间下的检测效果。流入电池的电流通过在电池正负极加一定的正向偏压进行控制,电源本身可以显示电压和电流的大小,电流分为5 A和10 A两种情况。在相同的输入电流条件下,探测器分别在5, 10, 15 s 3种不同的采集时间内对电池发出的红外光进行采集,结果如图3所示。从图中发现,沿着电极有一些等距离排列的

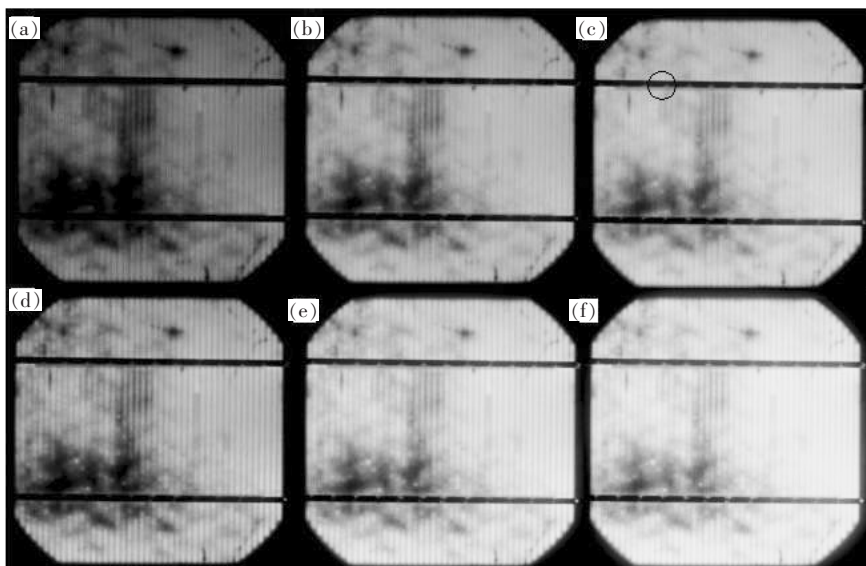


图3 不同控制条件下的检测效果。(a) 5 A, 5 s; (b) 5 A, 10 s; (c) 5 A, 15 s; (d) 10 A, 5 s; (e) 10 A, 10 s; (f) 10 A, 15 s。

Fig. 3 The test results under different conditions. (a) 5 A, 5 s. (b) 5 A, 10 s. (c) 5 A, 15 s. (d) 10 A, 5 s. (e) 10 A, 10 s. (f) 10 A, 15 s.

亮点,如图 3( c) 中的圆圈所示,估计与连接在电极上的铜探针有关,因为探针也是等距离分布的,微小亮点就是接触点发出的光。

从图 3 中可以发现,图( e) 的清晰度最好,细栅线的分布清晰可见,而且对于烧结部分的显示也较为明显。图( a) 较暗,图( b) 和( c) 的亮度也不够,电池细栅线分布不够清晰,说明 5 A 电流下的检测效果不佳。而图( d) 也相对较暗,缺陷显示不明显。图( f) 则因探测时间偏长,显示过亮,影响视线,边缘还出现朦胧的雾状。可见,电流 10 A、探测时间 10 s 为此时的最佳检测条件。但不同电池的具体情况不同,检测条件应当根据电池的实际情况进行调节。

图 4 所示为效率分别为 13% ( L1) ,15% ( L2) 和 17% ( L3) 的电池在加正向偏压时,所加偏压与发光强度的关系。

研究发现: 在相同偏压下,效率为 13% 的电池的发光强度最低,而效率为 17% 的电池的发光

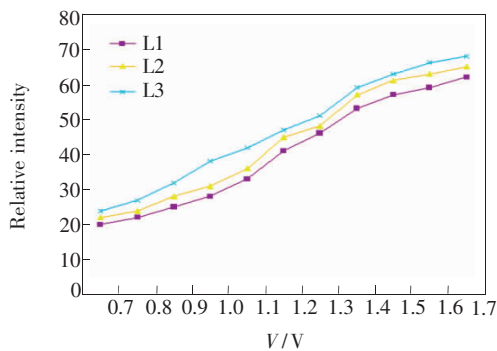


图 4 电池所加电压与光强的关系

Fig. 4 Cell light intensity in relation to the applied voltage

强度最高,说明效率越高的电池越容易发光。从机理上讲,效率越高的电池的少数载流子越多且扩散长度越大,相同偏压下的载流子复合几率也越大,导致发光强度就越高。

### 3.3 正向偏压下利用 EL 成像检测的缺陷类型

通过在电池两端加适当的正向偏压,调试好探测器的探测时间,分别检测单晶硅电池、多晶硅电池及薄膜电池。单晶和多晶硅电池的性质比较一致,开路电压都在 0.6 V 左右。薄膜电池属于高电压、低电流器件,其开路电压为 21 V 左右,需要加压到 35 V 以上才能检测到 EL 图像。这主要是由于薄膜的转化效率较低,发光强度较弱。图 5 显示了各种电池的缺陷类型,其中图( a) 方形圈内为黑芯,小圆圈内为断栅;( b) 中圆圈内为重掺杂;( c) 中椭圆内为污染;( d) 中椭圆内为外部边缘过热;( e) 中方形内为过烧结导致的缺陷;( f) 中圆形内主要为边缘栅线短路;( g) 中方框内微小细线为电池隐裂,偏亮的区域是电源电极和电池主栅线接触区域,其电压较其他位置偏高;( h) 中圆圈内的黑细线为边沿短路;( I) 为刮去( h) 中短路部分后的照片。这些缺陷可分为 3 类: 电池材料本身缺陷、电池工艺制作过程中引入的缺陷以及技术操作造成的缺陷。其中电池材料缺陷主要包含有黑芯片、重掺杂、位错簇片和暗晶粒片等 4 种类型,电池工艺制作过程引入的缺陷主要有断栅、工艺污染、烧结、边缘栅线短路等,技术原因造成的缺陷主要有隐形破裂、pn 结制反及 pn 结缺失等。

薄膜电池在正向偏压作用下也能发出红外光,

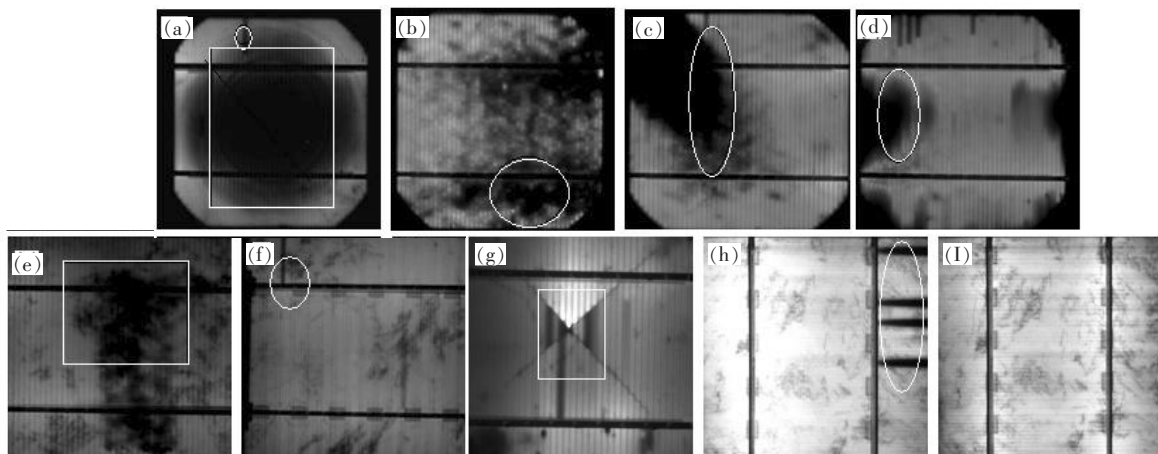


图 5 电池缺陷类型示意图

Fig. 5 The schematic diagram of cell defect type



只是由于电池效率较低,薄膜的发光较为微弱。本实验采用的是飞利浦公司制作的柔性非晶薄膜电池,电池面积为  $450 \text{ cm}^2$ ,开路电压为  $18 \text{ V}$  左右,短路电流为  $420 \text{ mA}$ 。本次测试正向电压加到  $28 \text{ V}$ ,电流约为  $2.2 \text{ A}$ ,由于电流相对较大,电池发热比较严重,为防止薄膜电池燃烧不能长时间通电。图 6 为薄膜电池的电致发光成像图,从图中发现有两个亮点,这是由于部分电池转化效率低,所以电流大部分从转化效率高的部分流过,导致这部分电池发出亮光。通过 EL 检测,可以发现薄膜中存在的缺陷和膜的不均匀之处,这对改进薄膜生产工艺具有重要的指导意义。

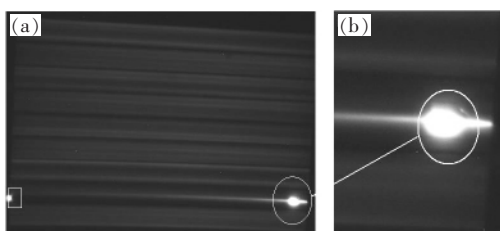


图 6 薄膜电池 EL 成像照片 (a) 及局部放大图 (b)  
Fig. 6 The EL image (a) and partial enlarged image (b) of the thin film cell

### 3.4 利用 EL 检测薄膜电池 pn 结预击穿缺陷

从理论上讲,太阳能电池的并联电阻是无穷大的。为了保证电池有较高的功率输出,不论是硅电池还是薄膜电池,理论上其 pn 结的反向击穿电压都很高。对于 p 型衬底上制备的杂质浓度在  $1.016 \text{ cm}^{-3}$  左右的硅太阳能电池,理论上其 pn 结的反向击穿电压约为  $50 \text{ V}^{[11]}$ 。但实际上由于各种缺陷和杂质的影响,太阳电池的并联电阻大大减小,所以电池的预击穿电压也随之减小,一般只有  $8 \sim 12 \text{ V}$  左右<sup>[2]</sup>。薄膜电池由于其禁带宽度要比晶硅电池大,因此理论上其预击穿电压要比晶硅电池高,但实际上其预击穿电压也远低于理论值。

图 7 (a) 显示了非晶硅薄膜电池在  $-21 \text{ V}$  偏压下的 EL 成像。非晶硅薄膜开路电压为  $12 \text{ V}$ ,短路电流为  $630 \text{ mA}$ ,理论上加到电池的反向电压至少要达到  $120 \text{ V}$  以上,但是实际上却只需加到  $-21 \text{ V}$ ,这说明薄膜电池的预击穿电压要远小于理论值。图中的白亮斑,我们猜测是由于电池的杂质缺陷密度作用,在  $-21 \text{ V}$  的反向偏压下预击穿离化而产生的 EL 现象。为了验证这一点,我们

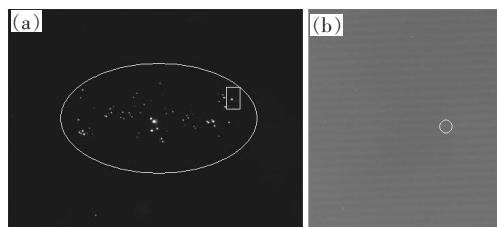


图 7 非晶硅薄膜电池在  $-21 \text{ V}$  偏压下的 EL 成像 (a) 和 DLIT 成像 (b)

Fig. 7 EL (a) and DLIT (b) image of the amorphous silicon membrane cell at  $-21 \text{ V}$  bias voltage

利用 DLIT 热成像进行对比。

将电池在反向偏压下通电一段时间,温度上升到  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ,利用福禄克公司生产的型号为 Ti50FT 热像仪进行检测。仪器检测的主要是器件的温度分布情况,当杂质缺陷存在时,其所在处就会在反向偏压下预击穿,有大量电流流过,温度相对于其他无杂质缺陷处要高一些。热成像检测结果如图 7 (b) 所示,检测到电池外观形状为多条并排的薄膜,圆圈内的白点对应于图 7 (a) 中的方形白点,表明此处处在预击穿状态。

上述实验证明在 pn 结杂质浓度较大,并在一定的反偏压下引起预击穿产生碰撞离化发光时,利用 EL 成像检测薄膜太阳能电池 pn 结的预击穿缺陷是一种切实可行的方法,但这并不说明所有的缺陷都能通过 EL 反偏压成像检测。

### 3.5 低效率功率电池片的 EL 检测分析

利用高准确度的 AAA 级型号为 Solar-cell 的模拟器对面积为  $125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$  的 A、B 两片单晶电池片的效率进行了测试,发现这两片电池的功率很低,分别只测到  $1.35 \text{ W}$  和  $1.60 \text{ W}$ ,其电性能曲线如图 8 所示。研究发现所测得的曲线并不形成完整的矩形,特别是 A 电池的  $I-V$  曲线成倾斜下滑趋势,B 电池曲线虽然相对成矩形,但还是有倾斜下滑趋势。

从测试数据发现,电池的并联电阻相对较小,其中 A 电池仅为  $0.563 \text{ }\Omega$ ,B 电池并联电阻相对高些为  $9.203 \text{ }\Omega$ 。由此可以判定电池的功率较低主要是由于并联电阻过小。下面进一步分析导致并联电阻减小的原因。

EL 成像检测结果表明,这两片电池都存在严重缺陷。从图 9 (a) 中可以发现,A 电池主要存在椭圆圈内所示的隐裂和方形圈内所示的污染等缺陷,这是导致并联电阻大大降低的主要原因;从

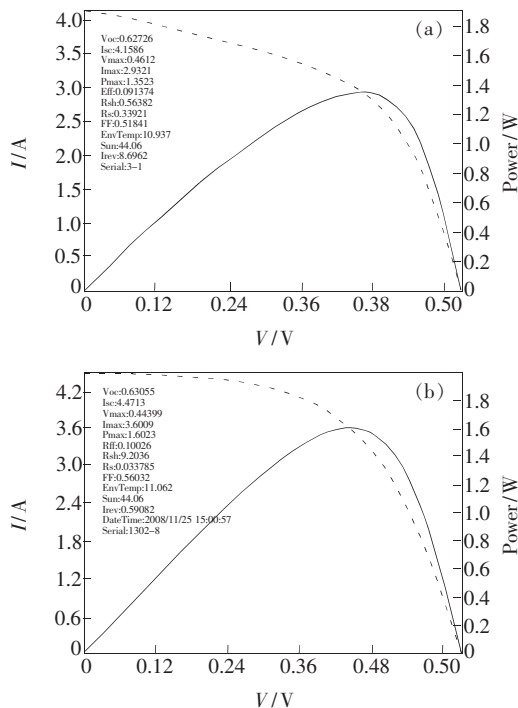


图 8 电池 A (a) 和 B (b) 的电性能曲线

Fig. 8 The electrical performance curve of cell A (a) and B (b)

图 9 (b) 中可以发现, B 电池存在严重烧过火现象, 如椭圆圈内所示。

$I-V$  测试可以从数据和曲线上分析判断电池效率低的原因, 而 EL 检测则可以更直观地判断。通过这两种测试, 可以更有效地改善和提高电池

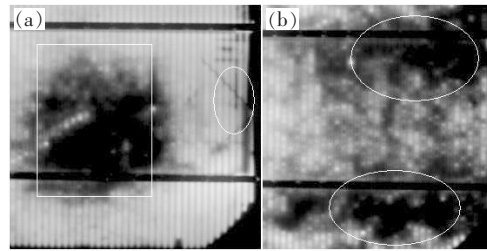


图 9 A 电池 (a) 和 B 电池 (b) 的 EL 成像

Fig. 9 EL images of cell A (a) and B (b)

的制作工艺。

## 4 结 论

硅太阳能电池在正向偏压下主要发红外光, 在探测器镜头上加 800 nm 以下波长的滤光片可以有效改善 EL 的检测效果。测试时间越长, 图片越清晰明亮; 一定范围内的正向偏压越大, 电池的发光也越强。调节合适的正向偏压和测试时间可以得到最佳的检测效果。在相同正向偏压下, 电池的发光强度与电池的效率成正比。通过 EL 成像检测, 可以发现电池存在的各种缺陷。实验结果表明, 利用 EL 成像检测薄膜太阳能电池 pn 结的预击穿缺陷是一种切实可行的方法。采用 EL 检测电池中的隐形缺陷对改进生产工艺、提高产品质量具有重要意义。

## 参 考 文 献:

- [1] Yin H P, Ye Z R, Wang X M, *et al.* Integrated research of electroluminescent technology in crystalline silicon solar cells [C]//The Eighth China Solar Grade Silicon and Photovoltaic Power Generation Conference. Shanghai: Shanghai Solar Energy Society, 2012.
- [2] LI Y H, Pan M, Pang A S, *et al.* The application of electroluminescence imaging to detection the hidden defects in silicon solar cells [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(4): 378-382 (in Chinese).
- [3] Xiao Y J, Liu X Y, Xie Y S. The study of uniform design for the laser system in the photoluminescence detection of silicon solar cell [C]// The Eighth China Solar Grade Silicon and Photovoltaic Power Generation Conference. Shanghai: Shanghai Solar Energy Society, 2012.
- [4] Würfel P, Trupke T, Puzzer T, *et al.* Diffusion lengths of silicon solar cells from luminescence images [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, 101(12): 123110-1-10.
- [5] Breitenstein O, Bauer J, Rakotoniaina J P. Aterial-induced shunts in multicrystal line silicon solar cells [J]. *Semiconductors*, 2007, 41(4): 440-443.
- [6] Breitenstein O, Bauer J, Trupke T, *et al.* On the detection of shunts in silicon solar cells by photo and electroluminescence imaging [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2008, 16(4): 325-330.
- [7] Zhang X Z, Zu L W, Zhu Q M. Research progress of synthesis and luminescent properties of PPV electroluminescent materials [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2009, 15(1): 16-18.
- [8] Ding B D, Zhu W Q, Jiang X Y, *et al.* Synthesis and electroluminescence characteristics of anthracene derivatives [J].

*Semicond. Optoelectron*, 2008, 29(5): 680-683.

- [9] Niu Z H, Guo Q, Ren D Y, *et al.* The use of electroluminescence to study the radiation effects of multi-junction solar cell [J]. *Research & Progress of SSE* ( 固体电子学研究进展 ), 2008, 28(1): 1-3 ( in Chinese ).
- [10] Ma T, Yu J S, Li L, *et al.* Characterization of organic light-emitting devices based on NPB doped in poly( N-vinylcarbazole ) matrix [J]. *Chin. J. Lumin.* ( 发光学报 ), 2008, 29(5): 809-814 ( in Chinese ).
- [11] Munoz J, Lorenzo E, Martinez-Moreno F, *et al.* An investigation into hotspots in two large grid connected PV plants [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2008, 16(8): 693-701.

## 《发光学报》入选“2012 年中国国际影响力优秀学术期刊”

近日,中国科学文献计量评价研究中心在北京国际会议中心召开新闻发布会,发布了“中国学术期刊国际影响力评价报告”。《发光学报》入选“2012 中国国际影响力优秀学术期刊”。发布会上,中宣部、新闻出版总署、科技部、教育部等有关领导为入选期刊授牌。

首届“中国最具国际影响力学术期刊”、“中国国际影响力优秀学术期刊”是依据《中国学术期刊国际引证报告(2012 版)》(简称《CAJ-IJCR》)按 2011 年度中国学术期刊被 SCI 期刊、SSCI 期刊的总被引频次和影响因子排序,经综合计算,最终遴选出的 TOP 5% 期刊和 TOP 5% ~ 10% 期刊。其中,科技期刊备选期刊为 3533 种,由上述方法选出 175 种“2012 中国最具国际影响力学术期刊”;人文社科类备选期刊为 680 种,选出 34 种“2012 中国最具国际影响力学术期刊”。同样,选出科技类“2012 中国国际影响力优秀学术期刊”175 种,人文社科类“2012 中国国际影响力优秀学术期刊”34 种,共计 209 种。这些期刊的主要指标可与 SCI、SSCI 期刊相比,标志着我国学术期刊“走出去”已经取得了令人鼓舞的显著成效。同时,在上榜的 418 个期刊中,中文期刊达 312 个,已成为具有相当影响力的国际化期刊。

