

文章编号: 0254-0096(2014)03-0487-05

# 利用电致发光技术快速测定晶硅太阳电池少子寿命

刘 霄<sup>1</sup>, 沈文忠<sup>1</sup>, 王 振<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学太阳能研究所, 上海 200240; 2. 上海欧普泰科技创业有限公司, 上海 200333)

**摘 要** 结合理论分析, 讨论太阳电池电致发光的影响因素, 提出利用电致发光技术来测定晶硅太阳电池的少子寿命。在完成测试定标后, 对比目前普遍使用的微波光电导衰退法, 对电致发光法测定单晶和多晶硅少子寿命进行实验验证。结果表明, 电致发光测试方法能快速、稳定、准确地测定晶硅太阳电池的少子寿命。

**关键词** 晶硅太阳电池; 电致发光; 少子寿命

中图分类号: TN307 文献标识码: A

## 0 引 言

晶硅太阳电池的少子寿命是评估太阳电池的重要参数之一<sup>[1]</sup>, 少子寿命反映了太阳电池表面和基体对光生载流子的复合速度, 即反映了光生载流子的利用程度。通过对少子寿命的测量, 可明确知道晶硅电池的质量情况, 从而作为质量监控和工艺调整的依据, 所以少子寿命的准确测量具有重要的实际意义。目前普遍应用的少子寿命测试方法有微波光电导衰退法( $\mu$ -PCD)、准稳态光电导法(QSS-PC)等<sup>[2]</sup>, 这些方法可以非接触地无损测量电池片的少子寿命, 但其设备昂贵, 测量时间较长(单片电池面扫描时间>3 min), 无法满足大规模太阳电池生产快速准确测量的要求。电致发光<sup>[3]</sup>(EL)成像具有成像时间短(<10 s)、分辨率高(300万像素以上)、设备简便等优点, 非常适应生产过程中快速检验和测量的需要。

本文借助相关理论分析影响太阳电池EL的因素, 通过定标电池片发光强度与少子寿命关系, 成功实现利用EL强度来测定晶硅太阳电池的少子寿命, 为在实际工程应用中快速测定少子寿命提供一种新方法。

## 1 EL测定少子寿命的理论分析

当太阳电池加正向偏压时, 在P-N结势垒区和扩散区注入了少数载流子, 这些非平衡少数载流子不断地与多数载流子复合而发光<sup>[4]</sup>。将晶硅太阳电池片简化为厚度为 $d$ 的理想P-N结, 在小注入和突变耗尽层条件下, 忽略辐射复合生成光子的重吸收。此时, 光子能量 $E$ 依赖的P-N结不同位置 $x$ 处的EL强度 $I_L(E, x)$ <sup>[5, 6]</sup>如式(1)。

$$I_L(E, x) = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \alpha(E) E^2 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV_f}{kT}\right) \left[ \frac{\exp\left(-\frac{x}{\sqrt{L_n}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{2d}{\sqrt{L_n}}\right)} + \frac{\exp\left(\frac{x}{\sqrt{L_n}}\right)}{1 - \exp\left(\frac{2d}{\sqrt{L_n}}\right)} \right] \quad (1)$$

式中,  $h$  普朗克常数;  $c$  真空中光速;  $\alpha(E)$  光子的吸收系数;  $E$  辐射复合产生光子的能量;  $q$  单位电荷;  $V_f$  在电池片上所加的正向偏压;  $k$  玻尔兹曼常数;  $T$  绝对温度;  $L_n$  电子(P型硅片)扩散长度。

将电子扩散长度  $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$  (其中  $D_n$  为扩散系数,  $\tau_n$  为少子寿命)代入式(1)并对光子能量  $E$  以及  $x$  求积分, 令积分结果为  $I_L$ , 如式(2)。

收稿日期: 2011-12-24

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2012CB934302)

通信作者: 沈文忠(1968), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事半导体光谱与光电子器件物理及太阳电池应用方面的研究。  
wzshen@sjtu.edu.cn

$$I_L = \int_E \frac{2\pi}{h^3 c^2} \alpha(E) E^2 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE \cdot \int_0^d \left[ \frac{\exp\left(-\frac{x}{\sqrt{D_n \tau_n}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{2d}{\sqrt{D_n \tau_n}}\right)} + \frac{\exp\left(-\frac{x}{\sqrt{D_n \tau_n}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{2d}{\sqrt{D_n \tau_n}}\right)} \right] dx \cdot \exp\left(\frac{qV_f}{kT}\right) = C \sqrt{D_n \tau_n} \frac{\left[ \exp\left(\frac{d}{\sqrt{D_n \tau_n}}\right) - 1 \right]}{\exp\left(\frac{2d}{\sqrt{D_n \tau_n}}\right) - 1} \exp(qV_f/kT) \quad (2)$$

式中,  $C$  为常数。从式(2)可知, 室温下影响晶硅太阳能电池 EL 强度的因素有外加正向偏压以及扩散长度(主要是少子寿命, 见下面讨论)。

一般情况下, 太阳能电池用的晶体硅材料扩散系数  $D_n$  为  $30 \sim 40 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 而当硅片厚度  $d$  为  $160 \sim 300 \mu\text{m}$ , 少子寿命低于  $10 \text{ ms}$  时,  $d \gg (D_n \tau_n)^{1/2}$ , 式(2)可以简化为式(3)。

$$I_L = C \sqrt{D_n \tau_n} \exp(qV_f/kT) \quad (3)$$

经过相同工艺处理制成的太阳能电池 P-N 结具有相同的掺杂浓度, 其载流子迁移率也为常数, 少子扩散系数满足爱因斯坦关系式<sup>[7]</sup>, 如式(4)。

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} \quad (4)$$

式中,  $\mu_n$  为电子迁移率。由式(4)可知, 室温下其少子扩散系数  $D_n$  为常数。所以, 在某一固定正向偏压下, 式(3)可进一步简化为式(5)。

$$I_L = A \sqrt{\tau_n} \quad (5)$$

式中,  $A$  为恒定偏压下为常数,  $A = C \sqrt{D_n} \exp(qV_f/kT)$ 。式(5)说明晶硅太阳能电池的 EL 强度与少子寿命平方根的线性关系, 通过对式(5)中斜率  $A$  的标定, 可利用 EL 方法计算得出太阳能电池的少子寿命。

## 2 EL 测定少子寿命实验及定标

### 2.1 晶硅太阳能电池 EL 能力与强度

为研究晶硅太阳能电池 EL 能力, 选取  $156 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$ , 厚度为  $200 \mu\text{m}$  的多晶硅太阳能电池片, 利用上海欧普泰科技创业公司研发的电池片 EL 检测设备, 在室温, 正向偏压  $5 \text{ V}$ , 曝光时间为  $8 \text{ s}$  的条件下由红外 CCD 镜头成像, 并对图像进行灰度变换分析处理得到灰度值分布, 灰度值显示的是图像中像素

点的亮暗级别, 即发光强度。将图像中每像素点灰度值相加之和为 EL 图像的相对发光强度值。图 1 给出了 3 块典型多晶硅电池片 EL 图像及其灰度值分布曲线, 横坐标为灰度值, 纵坐标为每种灰度值的像素点数量, 反映图像中每种灰度出现的次数, 灰度值为  $0 \sim 25$  的区间为低效率区, 此区间内的像素点发光强度低于最高发光强度的  $10\%$ 。通过计算, 3 块电池片的发光强度值分别为  $4.86 \times 10^7$ ,  $6.67 \times 10^7$ ,  $8.15 \times 10^7$ 。其中样品 1 存在大面积的工艺污染, 杂质原子在晶体中形成少数载流子的复合中心, 降低少子寿命, 电池片效率较低, 在外加偏压下 P-N 结由于注入而产生的电子-空穴辐射复合发光的几率变小, 使电致发光亮度减弱, 在电致发光图像上污染的部位以暗斑显示出来, 在灰度曲线上灰度值处于  $0 \sim 25$  的低效率区内像素点较多, 其发光强度值较低。样品 2 和样品 3 电池片无明显的缺陷, 效率较高, 像素点主要分布在灰度值较大的正常工作区, 其中样品 3 的效率最高, EL 信号也最强, 其发光强度值最高。由此可见, 在相同的测试条件下, 电池片的缺陷越少, 效率越高, 其 EL 能力越强。

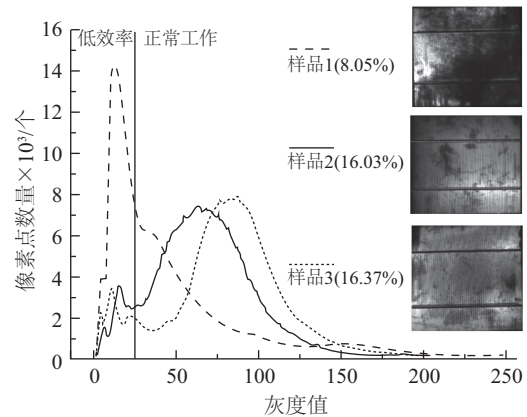


图 1 多晶硅太阳能电池 EL 图像及灰度值分布曲线

Fig. 1 EL images and gray value distribution of multi-crystalline Si solar cells

### 2.2 EL 强度与正向偏压的关系

由式(2)可知 EL 强度的对数与正向偏压成线性关系。实验选取单块单晶和多晶硅太阳能电池在室温,  $8 \text{ s}$  曝光时间下, 改变正向偏压的大小测量电池片的 EL 强度。从图 2 的实验结果可知, 单晶和多晶硅太阳能电池 EL 强度对数与正向偏压均满足理论上的线性关系。

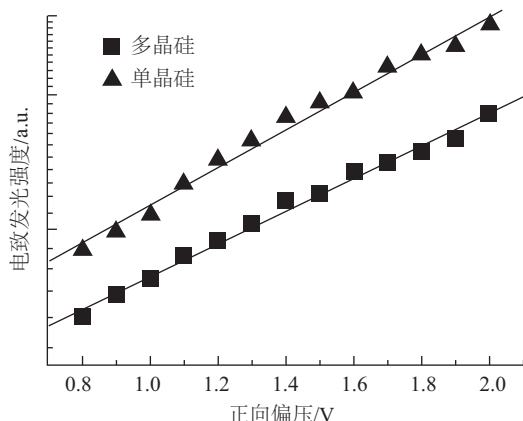


图2 晶硅电池电致发光强度与正向偏压的关系

Fig. 2 EL intensity of Si solar cells under different forward applied voltages

### 2.3 EL强度测量定标少子寿命

取电池片厚度  $d=200\text{ mm}$ ,  $V_f=5\text{ V}$ ,  $D_n=35\text{ cm}^2/\text{s}$ <sup>[8]</sup>, 用 Matlab 进行数值模拟式(2)中电池片 EL 强度与少子寿命的关系, 结果如图 3 中插图所示。随着少子寿命的增大, 电池片 P-N 结内辐射复合的光子生成几率增加, EL 强度增强。少子寿命较低时 EL 强度与少子寿命的平方根满足式(5)所示的线性关系, 但随着少子寿命的增大, 增强幅度减小, 不再满足线性关系。

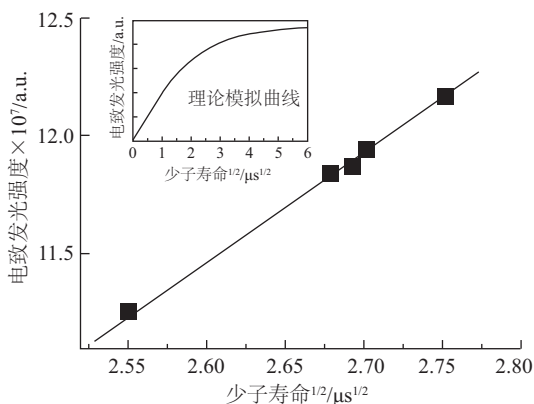


图3 单晶硅电池电致发光强度与少子寿命的关系

Fig. 3 EL intensity versus minority carrier lifetime in mono-crystalline Si solar cells

为验证晶体硅电池中 EL 强度与少子寿命的关系, 实验采用经过相同工艺制成的 5 块单晶硅电池片。首先利用 WT-2000 型少子寿命测试仪的  $\mu$ -PCD 法测得每块电池片的少子寿命, 然后在室温, 正向偏压 5 V, 曝光 8 s 的条件下测量其 EL 强度, 与少子

寿命进行对比, 得到图 3。EL 强度与少子寿命的平方根确实满足式(5)的线性关系, 经线性拟合计算出直线斜率, 即式(5)中常数  $A_{\text{单晶}}=4.418$ 。

另外, 在与测试单晶硅 EL 图像相同的条件下拍摄 5 块多晶硅电池片的 EL 图像, 采用上述定标方法对多晶硅太阳能电池的电致发光强度与少子寿命进行定标, 得到图 4, 经线性拟合计算后得出  $A_{\text{多晶}}=3.416$ 。由于多晶硅材料中位错和晶界对载流子复合的影响<sup>[9]</sup>, 在加正向偏压下, 多晶硅太阳能电池中光子生成率比单晶硅太阳能电池低, 使得定标得到的  $A_{\text{多晶}}$  比  $A_{\text{单晶}}$  低。

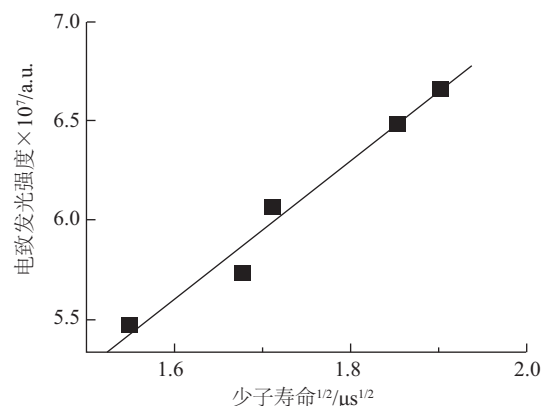


图4 多晶硅电池电致发光强度与少子寿命的关系

Fig. 4 EL intensity versus minority carrier lifetime in multi-crystalline Si solar cells

通过以上方法, 完成 EL 强度测量少子寿命的定标, 即可以利用 EL 强度来测定单晶硅以及多晶硅电池片的少子寿命。

## 3 EL测定少子寿命方法验证

作为验证, 再任取另外 5 块单晶硅片, 经过制绒、清洗、磷扩散、刻蚀、镀氮化硅减反膜、印刷、烧结等步骤制成太阳能电池, 利用电池片 EL 检测设备, 在室温, 正向偏压 5 V, 曝光时间为 8 s 条件下拍摄 EL 图像得到发光强度值, 根据式(5)和  $A_{\text{单晶}}=4.418$  计算出电池片的少子寿命, 与直接利用  $\mu$ -PCD 测得少子寿命进行对比, 如表 1 所示。

从表 1 和表 2 可知 EL 方法对于单晶与多晶硅太阳能电池均有很好的适用性, 利用 EL 测定的少子寿命与利用微波光电导衰退法测量出的少子寿命误差在  $0.05\text{ }\mu\text{s}$  (2%) 之内, 但由于单晶硅与多晶硅太阳能电池中光子生成率不同, 在测试之前需要对两种晶

体硅太阳能电池分别定标。

表1 电致发光法和微波光电导衰退法测量单晶硅少子寿命实验数据

Table 1 Minority carrier lifetime of mono-crystalline Si solar cells measured from EL and  $\mu$ -PCD techniques

编号	$\tau_{EL}/\mu s$	$\tau_{\mu-PCD}/\mu s$
1	7.304	7.228
2	7.255	7.288
3	7.575	7.411
4	6.499	6.695
5	7.179	7.393

再任取9块多晶硅片制成太阳能电池片,利用EL方法( $A_{多晶}=3.416$ )和 $\mu$ -PCD法分别测试其少子寿命,得到如表2的结果。

表2 电致发光法和微波光电导衰退法测量多晶硅太阳能电池少子寿命实验数据

Table 2 Minority carrier lifetime of multi-crystalline Si solar cells measured from EL and  $\mu$ -PCD techniques

编号	$\tau_{EL}/\mu s$	$\tau_{PCD}/\mu s$
1	3.6389	3.6124
2	3.5322	3.5656
3	3.4961	3.5506
4	3.3637	3.3229
5	2.7746	2.8106
6	2.7142	2.7305
7	2.6305	2.7007
8	2.5623	2.6560
9	2.4394	2.3566

同时,这种利用EL技术测定太阳能电池少子寿命新方法不仅适用于太阳能电池的整体发光强度和平均少子寿命,而且适用于电池片上每个位置的局部发光强度和少子寿命。图5为其中一块多晶硅电池片利用WT-2000型少子寿命测试仪测试出的少子寿命面分布图与EL图像的对比。比较图5,无论是图像总体分布还是其中低少子寿命区域(如图中黑斑),EL强度分布与少子寿命的分布都有清楚的对应关系。将太阳能电池片任意位置的EL发光强度值利用式(5)进行计算,即可在EL测试系统上得到该位置的少子寿命数值,而EL方法的曝光成像时间为8s,与 $\mu$ -PCD法的面扫描时间(约5min)相比,可显著缩短测试时间。说明无论是太阳能电池片整体

少子寿命还是其少子寿命分布情况均可利用EL技术简便快速地测定。

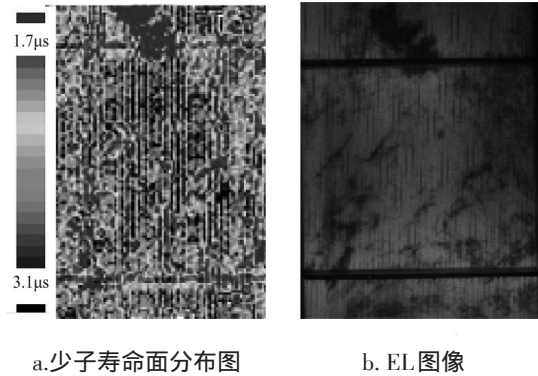


图5 微波光电导衰退法测量多晶硅电池少子寿命分布图与EL图像的对比

Fig. 5 Comparison between the minority carrier lifetime distributions in multi-crystalline Si solar cells measured from  $\mu$ -PCD and EL techniques

## 4 结 论

结合半导体PN结发光相关理论,提出一种利用电致发光技术来测量晶硅太阳能电池少子寿命的新方法。在定标EL发光强度与少子寿命的关系后,对单晶和多晶硅太阳能电池片的少子寿命进行验证实验,实验结果与 $\mu$ -PCD法有良好的可重复性,证明了该方法的可靠性。同时利用EL图像既可测量电池少子寿命的面分布,也可计算其统计分布,用来快速测试电池的局部以及整体性能。当然EL方法只能对晶硅太阳能电池片的少子寿命进行测试,无法测量原硅片的少子寿命,其应用范围有一定的局限性,但可配合EL的缺陷检测功能共同使用,为准确测量太阳能电池质量提供有力支持。

### [参考文献]

- [1] Garrido C L, Stolik D, Rodriguez J, et al. Influence of carrier recombination in the space charge region on minority carrier lifetime in the baseregion of solar cells [J]. Solar Energy Material & Solar Cell, 1999, 57(3): 239—247.
- [2] Schroder D K. Semiconductor material and device characterization [M]. New York: Wiley- Interscience, 395—417.
- [3] Fuyuki T, Kitiyanan A. Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells utilizing

- electroluminescence[J]. Applied Physics A , 2009 , 96 (1): 189—196.
- [4] 刘恩科,朱秉生,罗晋生,等. 半导体物理学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1998,286.
- [4] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng, et al. Semiconductor physics [M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1998, 286.
- [5] Würfel P, Tupke T, Puzzer T. Diffusion lengths of silicon solar cells from luminescence images[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101 (12): 123110- 1—123110 - 10.
- [6] 柳效辉,徐 林,肖晨江,等. 晶体硅太阳能电池电致发光的研究[J].太阳能学报,2011,32(6): 821—825.
- [6] Liu Xiaohui, Xu Lin, Xiao Chenjiang, et al. Study of the electrolum- inescence characterization of crystalline silicon solar cells [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(6): 821—825
- [7] 刘恩科,朱秉生,罗晋生,等. 半导体物理学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1998,143
- [7] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng, et al. Semiconductor Physics [M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1998, 143.
- [8] Fathi Y R, Faituri E L, Darkwi Ali Y. Computer simulation for current density in PN-silicon solar cells [J]. International Symposium on Solar Physics and Solar Eclipses, 2006, 27-29 :164—171.
- [9] Müller A, Ghosh M, Sonnenschein R, et al. Silicon for photovoltaic application [J]. Materials Science and Engineering B, 2006, 134(2-3): 257—262.

## FAST DETERMINATION OF MINORITY CARRIER LIFETIME IN CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS FROM ELECTROLUMINESCENCE TECHNIQUE

Liu Xiao<sup>1</sup>, Shen Wenzhong<sup>1</sup>, Wang Zhen<sup>2</sup>

(1. Institute of Solar Energy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Optech Science and Technology Corporation, Shanghai 200333, China)

**Abstract:** By the aid of detailed theoretical analysis, the factors affecting the solar cell electroluminescence (EL) intensity were investigated. A new EL technique has been proposed to measure the minority carrier lifetime of crystalline silicon solar cells through comparing with the results from the traditional  $\mu$ -PCD method. It is demonstrated that the EL technique is able to achieve fast, stable and accurate minority carrier lifetime of both mono- and multi-crystalline silicon solar cells.

**Keywords:** crystalline silicon solar cells; electroluminescence; minority carrier lifetime