

# 晶体硅太阳能电池少子寿命测试方法

周春兰, 王文静

(中国科学院电工研究所, 北京 100080)

摘要: 少数载流子寿命(简称少子寿命)是半导体晶体硅材料的一项重要参数, 它对半导体器件的性能、晶体硅太阳能电池的光电转换效率都有重要的影响。分别介绍了常用的测量晶体硅和晶体硅太阳能电池少子寿命的各种方法, 包括微波光电导衰减法 (MW-PCD), 准稳态光电导方法 (QSSPC), 表面光电电压 (SPV), IR 浓度载流子浓度成像 (CDI), 调制自由载流子吸收 (MFCA) 和光束 (电子束) 诱导电流 (LBIC, EBLO), 并指出了各种方法的优点和不足。

关键词: 晶体硅; 太阳能电池; 少子寿命; 微波光电导衰减; 准稳态光电导; 表面光电电压

中图分类号: O785, O77 文献标识码: A 文章编号: 1672-4984(2007)06-0025-07

Lifetime measurement for minority carrier of crystalline silicon solar cells

ZHOU Chun-lan, WANG Wen-jing

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Lifetime of minority carrier is one of the most important parameters for semiconductor material crystalline silicon. It is very important for the performance of semiconductor components and photoelectric conversion efficiency of crystalline silicon solar cells. Common lifetime measurement methods for minority carrier of crystalline silicon and crystalline silicon solar cells were introduced, including microwave photoconductivity decay ( $\mu$ -PCD), quasi-steady state photo-conductance (QSSPC), surface photoelectric voltage (SPV), infrared carrier density imaging (IR-CDI), modulation free-carrier absorption (MFCA) and laser beam (electron beam)-induced current (LBIC, EBLO) microscopy. Advantages and disadvantages of these methods were investigated too.

Key words: Crystalline silicon; Solar cells; Minority carrier lifetime;  $\mu$ -PCD; QSSPC; SPV

## 1 引言

光生电子和空穴从一开始在半导体中产生直到消失的时间称为寿命。当载流子连续产生时, 在太阳能电池中, 寿命的值决定了电子和空穴的稳定数量。这些数目决定了器件产生的电压, 因此它应该尽可能的高。寿命的一个重要方面就是它直接与扩散长度  $L_b$  相关,  $L_b = \sqrt{D_b \tau_b}$ ,  $D_b$  是材料的扩散系数,  $\tau_b$  是材料的体寿命, 扩散长度就是这个平均载流子从产生的点到被收集点 (p-n 结) 的平均距离。由于晶体硅太阳能电池性能主要决定于在电池体内和表面的电子-空穴复合, 因此, 在太阳能电池的研究内容中, 最为重要的是准确地获得载流子复合参数的实验方法, 测试体内的载流子寿命, 表面复合速度等的大小。

在测试的少子寿命中, 实际上是不同复合机制的综合结果, 测试的少子寿命实际上是整个样品的

收稿日期: 2007-03-22; 收到修改稿日期: 2007-06-11

基金项目: 国家 863 计划 2006AA05Z405

作者简介: 周春兰 (1977-), 女, 贵州湄潭人, 助理研究员, 博士, 主要从事晶体硅太阳能电池的研究。

有效寿命, 它是发生在 S 片或者太阳能电池不同区域 (体内、表面) 的所有复合叠加的净结果, 采用数学表达式能够将体内、表面各种复合机制对有效寿命的贡献分别呈现出来。定义 S 片前后表面的复合速度为  $S_{front}, S_{back}$ , S 片的厚度为 W, 在认为载流子的浓度在整个片子中分布均匀的假设下, 可以得到测试样品的有效寿命的表达式<sup>[1]</sup>:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} - \frac{1}{\tau_{intrinsic}} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{S_{front} + S_{back}}{W} \quad (1)$$

式中,  $\tau_{eff}$  为有效寿命,  $\tau_{intrinsic}$  为体硅材料的本征寿命, 包含了俄歇和辐射复合寿命,  $\tau_{SRH}$  是按照 Shockley-Read-Hall 模型<sup>[2]</sup>描述材料中的缺陷复合中心引起的少子复合寿命, 它们是载流子注入大小的函数。一般情况下, 可以近似认为  $S_{front}, S_{back}$  相同, 因此在式 1) 中的表面部分变为  $\frac{2S}{W}$ 。

为了得到材料的真实的体寿命值:

$$\left( \frac{1}{\tau_b} = \frac{1}{\tau_{intrinsic}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} \right)$$

需要对表面进行有效的钝化，从而消除或者减少表面复合；另外，如果使用非常高寿命的片子，假定  $S_{eff} = S$ ，那么通过式子 1) 就可以得到表面复合度  $S$  的上限值。

在片子的前后表面经过扩散形成 PN 结后，发射结或者扩散区域一般通过饱和电流密度  $J_{0e}$  来表征，这个参数包含了在薄扩散区域体内的俄歇复合以及在重掺杂表面区域的少子复合信息。例如，对于一个 P 型衬底，在认为载流子的浓度在整个片子中分布均匀的假设下，扩散 N 型发射结之后有效寿命可以表述为<sup>[1]</sup>：

$$\frac{1}{\tau_{eff}} - \frac{1}{\tau_{intrinsic}} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + [J_{0e, front} + J_{0e, back}] \frac{(N_A + n)}{q n_i^2 W} \quad (2)$$

在这个方程中， $N_A$  是片子的掺杂浓度， $J_{0e, front}$  和  $J_{0e, back}$  是在前后表面扩散区域的饱和电流密度， $n_i$  是材料的本征载流子浓度， $n$  是在某个光照强度下的过剩载流子浓度，类似的表述同样适用于对于 N 型衬底。对于未形成扩散结的硅片，它的体复合和表面复合部分与过剩载流子浓度的关系不是简单的线性关系，而从 2) 中可以知道， $J_{0e}$  与过剩载流子浓度成线性关系，因此可以通过在不同的载流子浓度下测试少子有效寿命的方法来得到  $J_{0e}$  的值，这种方法在高注入情况下尤其有效。

当片子在只有一面扩散（通过饱和电流密度  $J_{0e}$  来表征），而另外一面没有进行扩散（通过表面复合速度  $S$  来表征）的情况下，可以简单地将 1) (2) 两个方程式组合起来描述这种结构的有效少子寿命。实际上， $J_{0e}$  和  $S$  这两个概念在低注入的情况下是相关联的，即  $S_{eff} = J_{0e} N_A / q n_i^2$ 。

## 2 少子寿命测试方法

### 2.1 基于光电导的技术的测试方法

光电导是半导体材料的一个重要因素，它描述了材料的电导随着光照的变化。利用光电导测量少子寿命的方法有几种。所有的技术都是无接触的，工作原理就是光激发产生过剩载流子，这些过剩载流子在样品的暗电导基础上产生额外的光电导，载流子浓度的变化导致了半导体的电导的变化：

$$\Delta \sigma = q (\mu_n n + \mu_p p) \Delta n = q (\mu_n + \mu_p) W \Delta n \quad (3)$$

这里， $W$  是硅片的宽度， $\mu_n$  和  $\mu_p$  是电子、空穴的迁移率，是掺杂浓度和注入水平的函数。这些额外的光电导的时间变化反应了过剩载流子浓度和它的短期行为，也就是少子寿命。

按照半导体中载流子产生的途径不同，测试寿命有三个基本的方法<sup>[1]</sup>：

(1) 瞬态光电导衰减 (TPCD)：利用一个短脉冲作为光源，在光灭掉以后，脉冲产生的电荷载流子的衰变通过光电导随着时间的变化来监控。同时测量载流子消失的速率  $dn/dt$  和过剩电子浓度  $n$ ，由于每个光子产生一个电子-空穴对，因此  $n = p$ 。如果器件中没有电流，那么载流子浓度变化的速率等于复合几率：

$$\frac{d(n)}{dt} = - \frac{n}{\tau_{eff}} \quad (4)$$

这个方程显示了载流子浓度随着时间发生指数衰减，因此光电导也遵循这种指数衰减关系，这种方法经典地被称为瞬态光电导衰减 (TPCD)。

(2) 稳态光电导衰减 (SSPCD)：是保持一个稳定的已知的载流子产生率  $G$ ，通过产生和复合之间的平衡来决定有效寿命。这种方法具有测试非常低寿命的特点。在稳态中，光电导正比于光生载流子的数量以及它们的寿命。载流子的产生率与有效寿命之间的关系为：

$$G = \frac{n}{\tau_{eff}} \quad (5)$$

这个简单的表达式认为在整个厚度的样品中产生率是均匀分布的，并且具有均匀的过剩载流子浓度分布。然而，实际上它们并不均匀，在应用时认为  $n$  是一个平均值。

(3) 准稳态光电导 (QSSPC)：如果光照强度缓慢变化，在半导体中存在准稳态状态，从而产生了准稳态光电导方法 (QSSPC)：

$$\tau_{eff} = \frac{n(t)}{G(t) - \frac{\partial n}{\partial t}} \quad (6)$$

QSSPC 包含了以上两种 PCD 方法的优点，特别是它可以非常准确地测试短和长寿命。实际上，瞬态和稳态 PCD 是两个光电导随着时间衰减的特殊例子，是可以应用于载流子寿命独立于光脉冲宽度情况下的分析方法。瞬态和准稳态方法常用在测试半导体的少子寿命中，下面分别介绍基于这两种方式的常用的测试方法。

#### 2.1.1 微波反射光电导衰减 (MW-PCD)

微波光电导方法是一种瞬态方法，瞬态方法的优点在于不需要绝对测量过剩载流子的大小，而是通过光电导进行相对测量。缺点在于当瞬态方法测量短的载流子寿命时，需要快的电子学设备记录非常快的光脉冲和光电导衰减信号。

MW-PCD 技术<sup>[3]</sup>的测试原理是通过测试从样品表面反射的微波功率的时间变化曲线来记录光电导的衰减,也就是并未直接测试方程 1) 中的过剩载流子浓度变化。大部分 MW-PCD 方法使用脉冲光源在样品中产生过剩载流子,由于产生的过剩载流子使样品的电导发生变化,而入射的微波的反射率是材料电导的函数,即反射微波的能量变化也反映了过剩载流子浓度的变化。其测试系统示意图如图 1 所示,系统包括微波源,微波探测器,以及脉冲光源。脉冲激光作为硅片的注入光源,可在半导体材料中激发过剩载流子;微波源给出探测信号,检测半导体材料的光电导,微波经硅片反射后进入检波器和放大电路。当光照结束后,随着过剩载流子的逐渐衰减,微波的反射也越来越弱;通过分析反射微波曲线 ( $\sim \exp(-t/\tau_{eff})$ ) 的指数因子,可求得测试样品中的有效少子寿命。

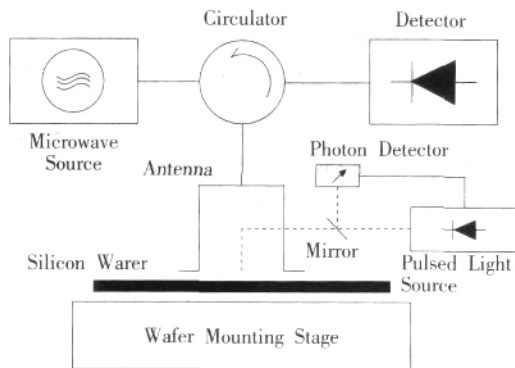


图 1 微波反射测试系统示意图

假设光注入处于小注入时,认为测量得到的微波反射信号正比于样品电导率,对微波反射功率  $P$  与电导  $\sigma$  之间的关系进行一级泰勒级数展开:

$$P = P_0 \left( 1 + \frac{dR}{d\sigma} \frac{d\sigma}{\sigma} \right) \quad (7)$$

将  $dR/d\sigma$  作为灵敏因子  $A$ ,  $A = C \sigma^{-1.5}$ ,  $P_0$  是入射的微波功率。一般来说, MW-PCD 技术在相对较低的注入水平下具有足够的灵敏度,但是对于重掺的片子或者在高注入水平下,由于微波的反射有可能等于 1, 这样在测试中反映不出来光脉冲对微波反射的影响,从而可能会使测试出现问题。因此微波反射方法适用于高电阻样品 (低掺杂), 它的测量局限于一个电导范围。现在有的研究使用射频光电导衰减 (RF-PCD) 方法解决在使用低电阻范围的问题<sup>[4]</sup>。

当硅片中的少子复合参数明显取决于过剩载流

子浓度时,经常采用一种小信号方法进行测量。在这种方法中,为了调整在硅片中的载流子注入水平,使用小功率激光产生时间分辨的小信号,同时叠加一个由白光偏置光产生的强度更大的恒定载流子信号<sup>[5]</sup>,这种偏置光为恒定光源,也就是直流光源,例如卤素灯,恒定光源的强度可以连续可调,通过使用电子学放大器和锁相技术,将脉冲激光产生的相对较小的载流子信号从偏置光的本底光照信号和本底噪音中分离出来。由于 MW-PCD 不能直接测试在不同光强下的过剩载流子浓度,需要借助于模型计算得到其值,从而得到表面复合速度或者体寿命与载流子注入水平的关系。

### 2.1.2 准稳态光电导衰减方法 (QSSPC)

QSSPC 的测试原理是通过射频电感耦合得到样品中的光电压或者光电流<sup>[6]</sup>。根据 4) 和 5) 式,如果在稳态和准稳态的过程中决定寿命,它就要求绝对测量过剩载流子浓度  $n$  的值;除此之外,同时也需要准确测量产生率  $G$ 。QSSPC 技术测量的是由一个相对长的脉冲光 ( $\sim 2\text{ms}$ ) 照射样品而产生的光电导,这个脉冲光可以通过闪光灯,发光二极管阵列或者其它光源获得,这么长的时间参数保证了在测试非常低寿命 ( $<200\ \mu\text{s}$ ) 的样品时,在闪光灯衰减的时间之内样品处于稳态情况,测试示意图如图 2 所示。通过一个光电探测器 (例如一个标准太阳能电池) 测量入射到样品表面的总的光通量,然后根据样品结构参数给出产生率  $G$ ; 校准后的射频电路感应耦合测试硅片的光电导,这个电路输出的时间分辨信号被示波器记录,最终经过计算机处理得到少子寿命或者  $J_{sc}$  的值。

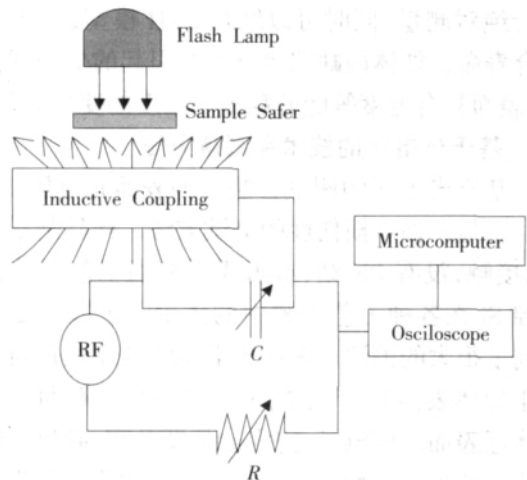


图 2 QSSPC 测试示意图<sup>[6]</sup>

在准稳态情况下,光产生的过剩载流子  $n = p$ ,



导致 Si 片电导率的增加,同时,产生率和复合率必须相等。利用少数寿命描述我们可以得出光生过剩载流子的产生率为:

$$G_{eff} = \frac{q n W}{L} \quad (8)$$

将 3) (8) 方程进行合并计算,得出:

$$\frac{1}{G_{eff}} = \frac{L}{q n W} \quad (9)$$

方程 3) 表明要绝对测量 n,必需知道光电导的大小。由图 2 所知,时间分辨的光电导和闪光灯的光强度的绝对值同时被射频电桥和标准太阳能电池各自记录。根据公式:

$$G = \frac{N_{ph} f_{abs}}{W} \quad (10)$$

$$n_a(t) = \frac{G}{q(\mu_n + \mu_p)W} \quad (11)$$

( $N_{ph}$  为光子数量,  $f_{abs}$  是吸收光所占入射光的份额),由测试得到的光电导和光强度,计算出样品中的 n 和 G,然后根据式 8) 计算出有效寿命。另外,通过测试在不同光照强度下的有效寿命和过剩载流子浓度 n,可以得到少数有效寿命随着过剩载流子浓度变化曲线  $\tau_{eff} \sim n$ ,结合 SRH 模型分析样品中与过剩载流子浓度相关的复合过程。对于进行扩散后的 Si 片,按照方程式 2) 对此曲线  $\tau_{eff} \sim n$  进行线性拟合,得到曲线的斜率,从而得出了 PN 结的饱和电流密度  $J_{cs}^{[7]}$ 。

**QSSPC 方法优越于其它测试寿命方法 (例如微波光电导方法) 的一个重要之处在于它能够在大范围光强变化区间 ( $10^{-5}$ ~1000 太阳) 内对过剩载流子进行绝对测量,同时可以结合 SRH 模型,得出各种复合寿命,如体内缺陷复合中心引起的少数复合寿命、表面复合速度等随着载流子浓度的变化关系。**

### 2.2 基于光电压的技术和测量方法

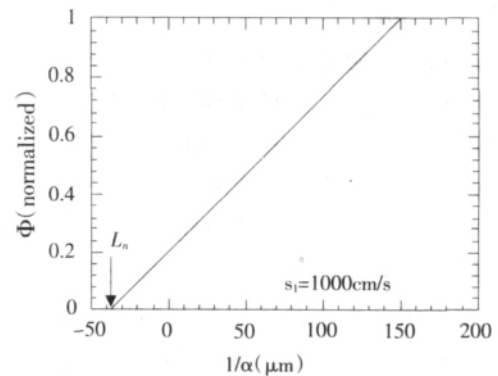
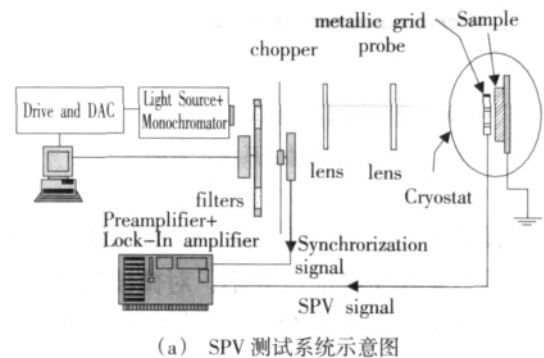
基于光电压的测试方法,即表面光电压 (SPV) 法。它是一种非损伤性的测试方法,样品制备简单 (无接触,没有 PN 结,或者无需高温工艺要求),在监控 Si 在各种工艺步骤中的体少数扩散长度方面得到了很大的关注。表面光电压法的原理是当光照在半导体表面时,产生电子-空穴对,一般而言在半导体近表面区域电子、空穴会重新分布,导致了能带弯曲的减少,这种能带弯曲的减少术语上称为表面光电压<sup>[9]</sup>。SPV 方法使用透明电极去测量由表面空间电荷区域聚集的载流子形成的电压。为了保持光电压和载流子扩散长度的线性关系,这个电压值一般

在 mV 量级。研究发现 SPV 是过剩载流子浓度的单一函数,而过剩载流子自身依赖于入射光通量,光学吸收系数,体少数扩散长度以及其它参数。

有两种方法测试扩散长度,一种是改变激发光的波长,调节光通量使在不同波长下得到相同的 SPV 值,这种称为恒定 SPV 方法;另外一种固定入射光的光强,而测试在不同波长下的 SPV 值。一般常用恒定 SPV 方法测试扩散长度,测试系统如图 3 所示<sup>[9]</sup>,利用能量高于能隙的斩波单色光照射样品,透明电极放在样品前面作为收集电压之用,光照之后在表面形成空间电荷区,而背面却保持暗状态,用锁相技术来提高信/噪比。可以根据以下关系来计算扩散长度:

$$\phi_{ph}^{-1} = L_b^{-1} + \alpha \quad (12)$$

式子中  $\phi_{ph}$  为某一个波长的光通量,  $\alpha$  是对应于此波长的吸收系数。在  $\phi_{ph}$  与吸收系数  $\alpha^{-1}$  的直线关系曲线中,直线在 y 轴的截距就是扩散长度,不在单一线性函数范围内的数据不予分析,从而消除了表面复合效应的影响<sup>[9]</sup>,然后根据  $L_b = \sqrt{D_b \tau_b}$ ,可以得出体寿命值。对于一个较好的测试系统,吸收系数与波长之间函数关系的不确定性是误差的主要来源。特别是多晶硅片中小晶粒的 ( $\alpha$ ),它与已知的单晶硅



(b) 得出的光通量与吸收系数之间的关系、直线的延长线与横坐标的交点即为扩散长度值

图 3 SPV 测试系统的示意图以及测试结果

的 ( ) 之间存在偏差, 另外, 表面的应力也会影响材料的吸收, 在重掺杂的硅片中, 长波长的自由载流子吸收也可能会有影响, 同时温度也会影响吸收系数, 因此一般测试都稳定在室温下进行。

SPV 方法适用于非常低的载流子注入水平。然而, 其它的寿命测试技术, 例如微波光电导衰减 (MW-PCD), 或者准稳态光电导 (QSSPC) 技术, 在相对低注入情况下敏感度降低, 同为重要的是它们在低注入情况下会受到少子俘获的影响。这种俘获产生了过剩的多子, 由于光电导包含了少子和多子, 因此在这种情况下光电导被歪曲, 这也是在 MW-PCD 的技术中加偏置光的另外一个原因, 因为增加偏置光之后减少少子的俘获。基于光电压的技术, 例如 SPV 方法, 由于只探测少子, 因此不受俘获的影响。综合这些考虑, 广泛使用的基于光电导的寿命测试方法比 SPV 方法方便, 但是比较适用于工作中、高注入情况。

### 2.3 其它方法

(1) 调制自由载流子吸收 (MFCA): 在这种方法中, 通过锁相技术测量平均过剩载流子浓度和谐波调制偏置光之间的相偏移以及和调制频率之间的关系。平均过剩载流子浓度用能量小于 Si 能隙的红外激光探测 (波长  $1.55 \mu\text{m}$ )。自由载流子的带内跃迁吸收这些光子, 并且吸收程度取决于红外光束探测区域的自由电子的总浓度, 探测红外激光在材料中的透射强度。有效寿命  $\tau_{\text{eff}}$  可以近似表述为:

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{\tan(\phi)}{b}, \text{ 当 } \phi < \frac{1}{b} \quad (13)$$

这里,  $\phi$  是测量的相偏移,  $b$  是角调制频率。使用波长小于硅能隙的激光二极管作为载流子激发光源, 光源由两部分组成: 恒定稳态部分和正旋信号部分, 为了在限定的注入水平下进行测试, 产生光源中正旋部分的强度是稳态部分的 10%。正如在 MW-PCD 中那样, 稳态部分的强度可以通过中性滤光片加以调节, 但是必须注意的是 MW-PCD 技术在  $10^{11} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  注入水平比较敏感, 而 MFCA 技术非常适合于测试较高过剩载流子浓度 ( $10^{14} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )。

(2) IR 载流子浓度成像 (CDI) [10]: CDI 的测试基础在于 Si 片中自由载流子的红外吸收。一个红外光源发出的红外光照射在硅片上, 另外一个快响应、在中红外区域 ( $3.5 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ ) 敏感的 CCD 相机结合锁相技术测试两种状态下的硅片的红外透射率: 在锁相周期的头半个周期内, 近似为 1 个太阳 (AM1.5G)

的半导体激光 ( $\lambda = 917 \text{ nm}$ ) 照在样品上, 产生过剩自由载流子, 在后半个周期内, 样品处于完全黑暗状态, 没有过剩载流子产生。这两个过程的图像之间的差异正比于过剩自由载流子的吸收, 也就是正比于局域过剩载流子的浓度。由于知道了产生几率  $G(x, y)$ , 实际寿命值可以通过  $\tau_{\text{eff}} = \frac{I(x, y)}{G(x, y)}$  计算得出。除了能够

测试出真实的载流子寿命之外, 如同 QSSPC 技术, 它也能够测试在不同注入水平下的有效寿命; 另外, 与具有二维成像的 MW-PCD 相比, 由于在 CDI 技术中, 激发光均匀照射在整个样品表面, 没有 MW-PCD 中存在的少子从非常小的光照点扩散出来的边缘效应, 同时测试的时间非常短, 适用于生产上的在线监控过程。

(3) 光束诱导电流 (LBIC) 方法 [11]: 这种方法是测量具有一定大小、形状的单色光束激发太阳电池产生的电流的光谱响应。在这种方法中, 光生载流子在光束照射的局域位置产生, 在所有光照产生的少子中, 只有不参与复合过程的少子才会产生电流信号。测量光束产生的短路电流, 通过这个短路电流, 同时测得了在这个光照区域的少子复合信息, 如少子扩散长度。如果确定分布在材料表面和体内的功率密度, 那么可以决定单位时间内产生的载流子数量。

为了获得绝对的光生电流值, 需要对光的强度进行标定 (如采用标准太阳电池), 利用锁相技术来提高信号的信噪比。当样品为太阳电池时, 使用光束表征更具有现实意义, 因为 LBIC 通过测试短路电流, 能够给出半导体器件的光电学性能的直接信息, 同时也能够给出晶粒边界的少子扩散长度, 或者复合速度等。另外还能够结合光反射测量得到样品的内量子效率分布, 它实际上是一种表征电池性能的很好方法 [12]。

(4) 电子束诱导电流 (EBIC) 方法: 电子束注入样品中产生电流, 这个电流可以用作描述样品特征图像的产生信号, 例如, 样品中 PN 结的位置, 存在的局域缺陷, 以及非均匀掺杂分布等 [13]。由于扫描电镜是电子束最为方便的源头, 大部分 EBIC 技术都在 SEM 上进行。当采用合适的电接触, 电子束注入样品产生的电子和空穴可以被收集、放大和分析, 因此载流子在不同局域位置产生、漂移或者复合的差异可以直接通过 EBIC 图像给出。电子束注入产生的电流的大小反映出电子和空穴的复合损失, 这也是为什么 EBIC 是一种观察半导体中缺陷复合中心

的有用方法。EBIC使用薄的肖特基接触(经常是Al),肖特基接触处于反向偏置电压下,漏电流信号被放大,并在显示器上显示出来。电学活性的缺陷使电流减少,在图像中显得比较暗,也反映了少子寿命比较低。如果电子束在整个样品表面进行扫描,就可以得到诱导电流的二维成像。

### 3 测试中的问题

(1) 根据公式(1)和(2),如果Si片表面进行很好的钝化,那么测量的寿命值就等于实际的Si材料的体寿命,这个值与光照的波长无关。对于测试相对低的体寿命,那么并不需要很好的表面钝化处理。例如,对于体寿命值为 $0.1\ \mu\text{s}$ 的样品,表面复合速度高到 $1000\ \text{cm/s}$ 是能够接受的。另一方面,如果体材料的少子寿命比较高,这就要求很好的表面钝化。例如,为了测量体寿命值 $>100\ \mu\text{s}$ 的样品,表面复合速度应该小于 $10\ \text{cm/s}$ 。

(2) 当表面复合速度大于 $1000\ \text{cm/s}$ 时,分别采用蓝光和红外光测试得到的有效寿命明显不一样。由于蓝光产生的光生载流子对表面复合速度非常敏感,而红外光则在硅中的注入深度较深,这就允许在测试时同时使用这两种光,从而将体寿命和表面复合速度从结果中分离出来<sup>[14]</sup>。但是对于较高的寿命值(大于 $10\ \mu\text{s}$ ),由于较高的表面复合速度(大于 $1000\ \text{cm/s}$ )完全将体复合信息掩盖,同时使用蓝光和红外光测试也不能将体寿命区分出来。

(3) 在扩散发射极形成之后,为了准确地测量Si片,可以使用波长较长的光照射样品,这样可以使在Si片体内产生相对均匀的载流子分布,同时减少光在发射极被吸收的成分<sup>[15]</sup>。

在这些方法中,基于MWPCD和QSSPC方法的设备在商业上已经比较成熟,如Semilab公司基于MWPCD的少子寿命测试仪,Sinton公司基于QSSPC的测试仪,国内也开展了这方面的研究和设备的研制<sup>[16]</sup>。另外的一些方法在实验室也得到一定的应用,总的说来,这些测试方法由于具有各自的特点而在实验室以及生产线上得到应用。

### 4 结束语

本文对晶体硅和晶体硅太阳能电池的少子寿命的常用测试方法进行了介绍,重点介绍了微波反射光电光电导衰减(MW-PCD),准稳态光电导(QSSPC),以及表面光电压方法(SPV)。并对各种方法的优缺点进行了总结,对实践具有一定的参考意义:

(1) 基于光电导的方法,例如MW-PCD和QSSPC方法相对于表面光电压SPV方便,在低注入

情况下它们的敏感度降低,比较适用于中、高注入情况。他们在低注入情况下受到少子寿命俘获的影响。这种俘获产生了过剩的多子,由于光电导包含了少子和多子,因此在这种情况下光电导被歪曲。MWPCD方法测试的信号是一个微分信号,而QSSPC方法能够测试少子寿命的真实值,在加偏置光的情况下,结合理论计算可以得出少子寿命随着过剩载流子的变化曲线,而QSSPC直接就能够测得过剩载流子浓度,因此可以直接得出少子寿命与过剩载流子浓度的关系曲线,并且得到PN结的暗饱和电流密度;MWPCD由于使用的脉冲激光的光斑可以做到几个到十几个,甚至更小的尺寸,在照射过程中,只有这个尺寸范围的区域才会被激发产生光生载流子,也就是得到的结果是局域区域的差额寿命值,这对于寿命分布不均匀的样品来说,结果并不具备代表性。可以利用激光光斑小的优点,对样品进行面扫描,可以得出片子或者电池中少子寿命的平面分布图象。

(2) 在SPV方法中,少子吸收系数和迁移率的值必需准确知道。在SPV方法中,少子寿命可以通过测得的扩散长度获得。当在低注入条件下工作时,在某种情况下SPV和PCD方法得出的少子寿命值应该相同。在SPV方法中,少子吸收系数和迁移率的值必须准确知道。在PCD测量的过程中,表面复合效应需要很好的说明,在测试中表面复合效应必须被消除。

(3) 同时介绍的其它测试方法也具有自身的优缺点,LBIC不光能够测试晶体硅电池片的体扩散长度,同时也可以测试不同波长的光的光电流,可以测试电池片在某个波长下的量子效率,直接表征电池的光电性能。而EBIC一般测试的是半导体材料表面几十个纳米深度的缺陷信息。而MFCA技术非常适合于测试较高过剩载流子浓度;CDI技术中,激发光均匀照射在整个样品表面,没有在MW-PCD中存在的少子从非常小的光照点扩散出来的边缘效应,同时测试的时间非常短,适用于生产上的在线监控过程。

由于在具体测试过程中有一些应该考虑到的问题,因此在实际测量中,应根据具体情况选用合适的测量方法,才能得到较精确的结果。

#### 参考文献

- [1] Markvart T, Castaner L. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications [M]. UK: Elsevier, 2003: 234.



- [2] <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/quay/node41.html>; <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/palankovski/node53.html>.
- [3] Schmidt J, Aberle A G. Accurate method for the determination of bulk minority-carrier lifetimes of mono- and multicrystalline silicon wafers [J]. J. Appl. Phys., 1997 ( 81 ) : 6186- 6199.
- [4] Michel J, Black R M, et al. In-situ wafer contamination detection through rf-PCD Measurements. Proc. SPIE, 1995 ( 2638 ) : 256- 262.
- [5] Schuurmans F M, Schönecker A, et al. Simplified evaluation method for light-biased effective lifetime measurements [J]. Appl. Phys. Lett., 1997, 71 ( 13 ) : 1795- 1797.
- [6] Sinton R A, Cuevas A. Contactless determination of current-voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data [J]. Appl. Phys. Lett., 1996, 69 ( 17 ) : 2510- 2512.
- [7] Kane D E, Swanson R M. Measurement of the emitter saturation current by a contactless photoconductivity decay method. 18<sup>th</sup> IEEE photovoltaic Specialists Conference [C], Las Vegas, 1985.
- [8] Dieter K, Schroder. Surface voltage and surface photovoltage history, theory and applications [J]. Meas. Sci. Technol., 2001 ( 12 ) : 16- 31.
- [9] Kirilov K, Donchev V, et al. A surface photovoltage spectroscopy system used for minority carrier diffusion length measurements on floating zone silicon [J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2005 ( 7 ) : 533- 536.
- [10] Linnros J. Carrier lifetime measurements using free carrier absorption transients. I. Principle and injection dependence [J]. J. Appl. Phys., 1998 ( 84 ) : 275- 283; J. Linnros. Carrier lifetime measurements using free carrier absorption transients. II. Lifetime mapping and effects of surface recombination [J]. J. Appl. Phys., 1998 ( 84 ) : 284- 291.
- [11] Hiltner J F, Sites J R. High-resolution laser stepping measurements on polycrystalline solar cells [C]. Proc. 16th European PV Solar Energy Conf, Glasgow, 2000.
- [12] Jim Sites, Tim Nagle. LBIC light-beam-induced current analysis of thin-film polycrystalline solar cells [C]. 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference, Lake Buena Vista, 2005.
- [13] Pandelov S, Seifert W. Analysis of local electrical properties of grain boundaries in Si by electron-beam-induced current techniques [J]. J. Phys: Condens. Matter, 2002 ( 14 ) : 13161 - 13168.
- [14] Bail M, Breandel R. Separation of bulk and surface recombination by steady state photoconductance decay method [C]. Proc. 16<sup>th</sup> European photovoltaic solar energy conf., Glasgow, 2000.
- [15] Brody J, Rohatgi A. Sensitivity analysis of two-spectrum separation of surface and bulk components of minority carrier lifetimes [J]. Solid-State Electronics, 2002 ( 46 ) : 859- 866.
- [16] 万振华, 崔容强, 徐林, 等. 半导体材料少子寿命测试仪的研制开发 [J]. 中国测试技术, 2005, 31 ( 2 ) : 118- 120.

(上接第 18 页)

间, 主管部门与加气站之间可实现数据互访及资源共享。加气站的主要安全参数, 如加气压力等可由当地特检部门实时监控。同时, 企业主管决策机构也可通过该系统实时了解企业的安全状况和经营情况。

#### 4.7 系统运行结果示例

系统运行生成的加气站日报表如表 1 所示; 实时监测页面如图 2 所示。

### 5 结束语

该系统在线水露点测量和硫化氢含量在线测量尚有待完善, 目前系统主要完成安检信息验证和信息化管理功能。系统在四川遂宁市城南加气站试用半年以来, 工作稳定, 数据采集与传输安全可靠, 得到用户的认可, 极具推广价值。

### 参考文献

- [1] 朱清澄, 黄海波, 何太碧. CNG 加气站几个安全技术问题 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2006, 25 ( 1 ) : 14- 16.
- [2] 钟建东, 王志, 等. CNG 钢瓶爆炸事故分析和预防措施 [J]. 锅炉压力容器安全技术, 2003 ( 1 ) : 29- 32.
- [3] 何太碧, 黄海波, 张浩, 等. CNG 汽车加气站国产设备使用情况研究 [J]. 天然气工业, 2002, 26 ( 8 ) : 141- 144.
- [4] 何鑫. CNG 加气机卡机联动及网络管理系统介绍 [J]. 天然气经济, 2006 ( 2 ) : 65- 67.
- [5] 曾文秀, 裴玲丽. 在线监测 CNG 加气站的天然气含水量 [J]. 石油化工自动化, 2007 ( 2 ) : 75- 77.
- [6] 龙其云, 张亚敏. 四川省 CNG 汽车发展状况分析和展望 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2006, 25 ( 4 ) : 1- 3.
- [7] 王莉. 浅谈我国 CNG 加气站和 CNG 汽车的发展 [J]. 石油规划设计, 2003, 14 ( 5 ) : 4- 5.
- [8] 曾文秀, 裴玲丽. 在线监测 CNG 加气站的天然气含水量 [J]. 石油化工自动化, 2007 ( 2 ) : 75- 77.