

# 晶体硅太阳能电池双层电极优化分析与实验研究\*

李涛<sup>†</sup> 周春兰 刘振刚 赵雷 李海玲 刁宏伟 王文静

(太阳能热利用及光伏系统重点实验室, 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

(2011年2月27日收到; 2011年5月30日收到修改稿)

相对于单层电极结构, 优化的前表面双层电极能够明显减小功率损失, 改善晶体硅太阳能电池的电学特性. 本文对晶体硅太阳能电池的双层电极进行了优化分析和实验研究. 通过扫描电子显微镜观测将双层电极的截面抽象为更接近于实际的半椭圆型, 建立了太阳能电池前表面的双层电极模型, 理论分析了双层电极的电学损失和光学损失. 结合丝网印刷后光诱导电镀太阳能电池的实验, 得到了理论和实验上的最优化光诱导电镀增厚电极厚度与丝网印刷电极宽度的关系. 所得到的理论和实验结果符合良好. 由于并不涉及电极制备的具体技术, 双层电极理论模型普遍适用于多种类型的双层电极结构.

**关键词:** 光诱导电镀, 双层电极, 电学损失, 光学损失

**PACS:** 88.40.jj, 88.40.H-, 88.40.-j

## 1 引言

为了增加目前产业化太阳能电池的效率, 需要减小前表面电极所引起的功率损失<sup>[1,2]</sup>. 主要有以下四种方法: 1) 减小电极栅线宽度; 2) 增加电极栅线高度; 3) 减少电极栅线的电阻率; 4) 减小发射极与电极栅线之间的接触电阻. 第一种方法能够减少太阳能电池的光学损失, 而后三种方法能够减少太阳能电池的电学损失. 综合考虑电池前表面的电学损失和光学损失, 为了同时减少光学和电学两方面的功率损失, 近年来新兴起的双层电极技术<sup>[3-6]</sup>是首先在前表面沉积一层种子层电极, 然后采用光诱导电镀的方法增厚金属电极. 底层电极可以应用丝网印刷 (screen printing)<sup>[7]</sup>、喷墨印刷 (inkjet printing)<sup>[8-10]</sup>、气动印刷 (aerosol printing)<sup>[11,12]</sup> 等技术, 通过采用含有玻璃料的 Ag 浆料, 保证发射极与金属电极之间有低的接触电阻; 而顶层电极一般采用二次印刷高 Ag 含量浆料的丝网印刷技术或者光诱导电镀技术<sup>[4,13,14]</sup>, 以保证低的金属栅线电阻. 采用双层电极技术能够明显增加电池电极高宽比, 从而在减少光学损失的同时保证低的电池串联电阻. 在种子层电极上光诱导电镀高纯度的银电极

可以显著降低栅线电阻, 光诱导电镀的银电极表面致密性明显优于丝网印刷的银电极, 如图 1 所示.

韩国 LG 电子公司研究发现, 双层电极结构能够通过减小接触电阻和栅线电阻来明显降低电池的串联电阻, 并且改善填充因子<sup>[15]</sup>. 德国夫琅和费太阳能研究所采用不同的光诱导电镀溶液对双层电极结构进行了实验研究, 得到了不同栅线电阻情况下最佳的电镀厚度<sup>[13]</sup>. 同时, 该研究所采用气动印刷后光诱导电镀的双层电极技术, 将太阳能电池的转化效率提升到了 20.3%<sup>[14]</sup>.

在常规丝网印刷单层电极技术的丝网印刷浆料中, 不仅需要添加必需的金属 Ag, 而且需要添加刻蚀氮化硅薄膜的玻璃料, 以使半导体-金属界面在后续的烧结过程中形成良好的欧姆接触<sup>[16-20]</sup>. 但是, 玻璃料的添加使得丝网印刷银电极的电导率相对于纯银电极低 2 到 3 倍<sup>[15]</sup>, 这就增加了电池前表面的电学损失, 从而不利于得到高填充因子的太阳能电池. 因此, 单层丝网印刷电极结构难以同时减小电池的接触电阻和栅线电阻<sup>[21-23]</sup>. 此外, 玻璃料的添加制约了单层电极丝网印刷 Ag 浆料黏度的提高, 使得该类技术难以得到大高宽比的电池电极, 进而增大了电池前表面的光学损失<sup>[24]</sup>. 因此,

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (批准号: KGCX2-YW-382) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA05Z437) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: litao@mail.iee.ac.cn

能够同时降低接触电阻和栅线电阻的双层电极技术就成为了未来产业化太阳电池技术的重点研究方向.

双层电极设计的关键在于通过对每一层电极电学损失和光学损失的分析,对电极进行整体优化.底层的种子层电极与发射极之间应该有低的接触电阻和良好的电极黏附性;而顶层电极应该有低的栅线电阻率,以保证低的金属栅线电阻.同时,双层电极需要具有优化的电极高宽比,减小前表

面的光学损失.本文工作主要基于丝网印刷后光诱导电镀双层电极技术,通过建立太阳电池前表面的双层电极模型,分析底层电极和顶层电极的电极宽度、电极高度、栅线电阻率等因素对电学损失和光学损失的影响.通过对方块电阻和丝网印刷宽度这两个产业化太阳电池生产中的重要参数的改变,计算了在不同丝网印刷电极宽度条件下的最优化的光诱导电镀增厚电极厚度,且进行了实验上的测量比对.

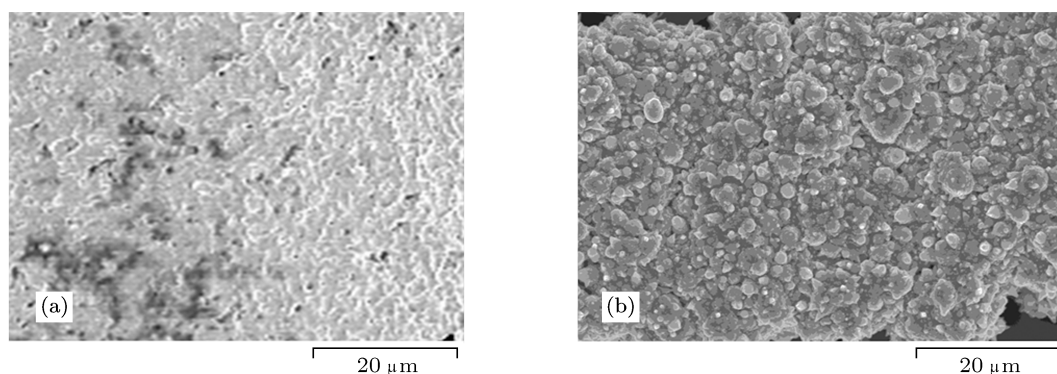


图1 扫描电子显微镜 (SEM) 观测的丝网印刷电极表面 (a) 和丝网印刷后光诱导电镀电极表面 (b)

## 2 双层电极理论模型

产业化丝网印刷的太阳电池前表面是由产生光生载流子的受光氮化硅区域和收集载流子的银电极区域组成的.增大银电极区域可以提高光生载流子的收集效率,减少前表面电极的电学损失.但是,这样同时也减小了受光的氮化硅区域,从而增大了前表面电极的光学损失.在太阳电池前表面电极的设计过程中,必须要综合考虑前表面银电极所引起的光学损失和电学损失两方面的因素,结合扩散层的掺杂分布对银电极的栅线宽度和栅线间距进行优化设计.当电流通过扩散发射极,穿过半导体-金属交界面,沿细栅和主栅流动时,就会产生电学损失.前表面银电极的电学损失主要是由组成太阳电池串联电阻的三类电阻引起的:发射极电阻,银电极与硅半导体的接触电阻,银电极电阻.前表面银电极的电学损失对电池输出性能的影响十分显著,必须通过对电极的优化设计及制备,来减小整个太阳电池的串联电阻,从而提高电池的填充因子和光电转换效率.前表面银电极栅线的示意图见图2.其中, $L$ 代表电池边长, $S_b$ 代表主栅间距, $S_f$ 代表细栅线的间距, $W_f$ 代表细栅宽度, $W_b$ 代表主

栅宽度.

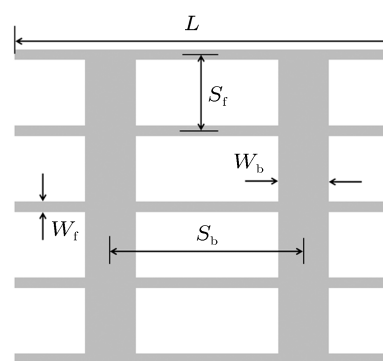


图2 前表面银电极栅线示意图

通常太阳电池电学损失和光学损失的分析都是将电池的栅线电极的截面抽象为半圆型<sup>[25]</sup>.但是,根据SEM对丝网印刷和丝网印刷后光诱导电镀这两种电极的观测表明,电极的截面更接近于半椭圆型,如图3所示.

实验样品的双层电极是由底层的丝网印刷电极和顶层的光诱导电镀电极组成的,根据SEM观测的结果,丝网印刷的细栅和主栅在经过相同时间的光诱导电镀后,增厚电极厚度基本一致,因此细

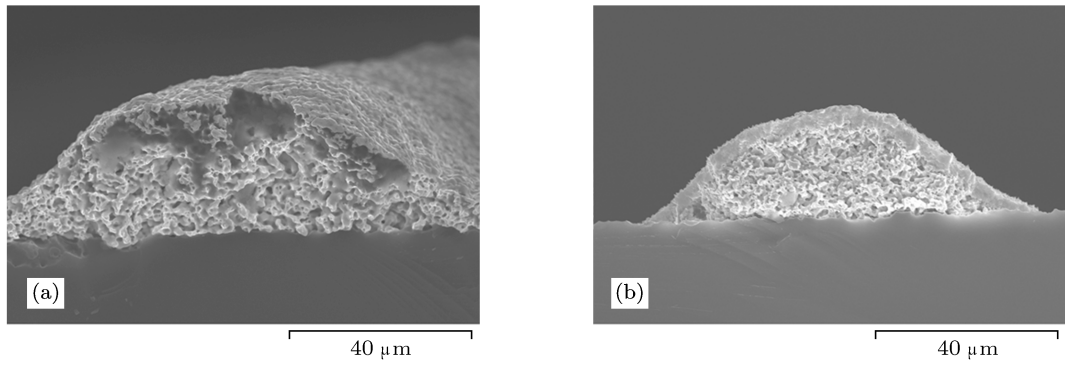


图3 SEM观测的丝网印刷电极截面 (a) 和丝网印刷后光诱导电镀电极截面 (b)

栅和主栅光诱导电镀增厚电极的厚度可以用统一的参量  $T_p$  来表示. 如果用  $W_{f-screen}$  和  $W_{b-screen}$  分别代表丝网印刷的细栅和主栅的宽度, 那么细栅和主栅双层电极的宽度就可以表示为

$$\begin{aligned} W_f &= W_{f-screen} + 2T_p, \\ W_b &= W_{b-screen} + 2T_p. \end{aligned} \quad (1)$$

假设  $R_{f-screen}$ ,  $R_{f-plating}$ ,  $R_{b-screen}$  和  $R_{b-plating}$  分别代表细栅丝网印刷银电极的薄层电阻、细栅光诱导电镀银电极的薄层电阻、主栅丝网印刷银电极的薄层电阻和主栅光诱导电镀银电极的薄层电阻, 那么它们可以表示为

$$\begin{aligned} R_{f-screen} &= \rho_s / A_{f-screen}, \\ R_{f-plating} &= \rho_p / A_{f-plating}(T_p), \\ R_{b-screen} &= \rho_s / A_{b-screen}, \\ R_{b-plating} &= \rho_p / A_{b-plating}(T_p), \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\rho_s$  代表丝网印刷银电极的体电阻率, 为  $3.2 \times 10^{-6} \Omega/\text{cm}$ . 而  $\rho_p$  代表光诱导电镀银电极的体电阻率, 为  $1.9 \times 10^{-6} \Omega/\text{cm}$ , 接近于银材料的体电阻率  $1.59 \times 10^{-6} \Omega/\text{cm}$ <sup>[13,26]</sup>.  $A_{f-screen}$ ,  $A_{f-plating}$ ,  $A_{b-screen}$  和  $A_{b-plating}$  分别代表细栅丝网印刷银电极的横截面积、细栅光诱导电镀银电极的横截面积、主栅丝网印刷银电极的横截面积和主栅光诱导电镀银电极的横截面积. 而横截面积  $A_{f-plating}$  和  $A_{b-plating}$  是光诱导电镀增厚电极厚度的函数. 由于丝网印刷电极和光诱导电镀电极是并联的关系, 因此细栅银电极的薄层电阻  $R_f$  和主栅银电极的薄层电阻  $R_b$  可以表示为

$$\begin{aligned} 1/R_f &= 1/R_{f-screen} + 1/R_{f-plating}, \\ 1/R_b &= 1/R_{b-screen} + 1/R_{b-plating}. \end{aligned} \quad (3)$$

在太阳电池内部, 基体电流的方向一般是垂直

于电池表面的. 而在太阳电池的表层, 电流横向流动, 经部分覆盖电池顶层的银电极引出. 假设在均匀光照情况下, 栅线银电极之间的横向电流为零, 数值上向两侧线性增加, 在栅线处达到最大值. 因此, 由发射极电阻、主栅和细栅银电极与硅半导体的接触电阻和银电极体电阻所引起的前表面电学损失为<sup>[27]</sup>

$$\begin{aligned} P_e &= R_s J_m S_f^2 / 12V_m + R_c J_m S_f / V_m W_f \\ &\quad + S_b^2 R_f S_f J_m / 12V_m \\ &\quad + L^2 S_b R_b J_m / 12V_m, \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $R_s$  代表发射极的方块电阻, 而  $J_m$  和  $U_m$  分别代表电池最大功率输出点的电流密度和电压. 而太阳电池发射极与银电极之间的比接触电阻  $R_c$  表示为<sup>[28]</sup>

$$R_c = \exp\left(\frac{2\sqrt{\varepsilon m^*}}{\hbar} \cdot \frac{\Phi_B}{\sqrt{N_D}}\right), \quad (5)$$

其中,  $\varepsilon$  代表半导体的介电常数,  $m^*$  代表载流子的有效质量,  $\hbar$  代表约化普朗克常量,  $\Phi_B$  代表肖特基势垒高度,  $N_D$  代表掺杂浓度. 为了计算太阳电池前表面电极的功率损失, 不仅要考虑到银电极的电学损失, 而且要考虑银电极的光学损失. 当太阳光入射到晶体硅太阳电池上时, 入射到电池电极表面的太阳光部分被吸收, 部分被反射出组件, 部分反射到电池氮化硅受光区域. 由于银电极对太阳光的吸收会造成吸收损失, 而电极将入射的太阳光反射出组件会造成反射损失, 这两部分损失之和就是银电极所产生的光学损失. 决定晶体硅太阳电池前表面光学损失的因素并不是简单的细栅和主栅的几何宽度, 而是根据栅线具体的形态所决定的有效宽度比. 由于部分入射的太阳光被银电极和封装玻璃反射到太阳电池的受光区域, 与直接入射到太阳电池

氮化硅减反薄膜的太阳光共同产生光电流<sup>[29-31]</sup>, 因此有效宽度比实际上明显小于银电极的几何宽度. 表征光学损失的有效宽度比定义为经太阳电池银电极反射后离开电池组件的部分太阳光与入射到太阳电池表面的太阳光总量的比值. 根据太阳电池 *I-V* 测试仪中, 太阳光模拟器入射光始终垂直于太阳电池表面的特点, 前表面银电极对太阳光的反射主要分为以下两种情况, 如图 4 所示:

- 1) 太阳光入射到银电极两侧边缘区域, 直接反射到电池受光表面;
- 2) 太阳光入射到银电极中间区域, 然后经反射后离开.

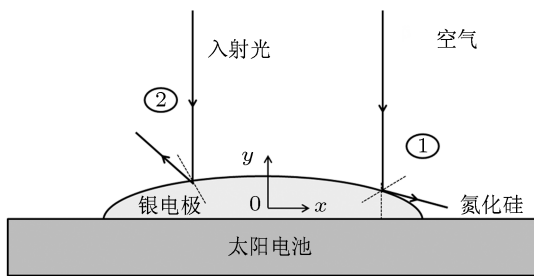


图 4 太阳光被银电极反射的两种不同情况

在第一种情况中, 太阳光虽然入射到银电极表面, 但还是被反射到太阳电池氮化硅受光区域, 参与了光电流的产生. 然而在第二种情况中, 太阳光被银电极反射后在空气 - 玻璃界面折射出太阳电池组件, 决定了银电极光学损失的有效宽度比. 根据实验上 SEM 的观测, 丝网印刷与丝网印刷后光诱导电镀太阳电池的银电极的截面近似于半椭圆型. 采用直角坐标系, 取坐标原点位于椭圆中心, 并且假设半椭圆型细栅截面的长半轴为  $W_f/2$ , 离心率为  $e_f$ ; 主栅截面的长半轴为  $W_b/2$ , 离心率为  $e_b$ . 根据椭圆方程和反射定律, 当太阳光入射到银电极边缘, 电极对光线的反射角逐渐变大, 则太阳光将直接反射到太阳电池氮化硅区域, 通过几何关系计算得到第一种情况中的临界位置表示为

$$\begin{aligned} W_{ef} &= W_f \cdot (2 - e_f^2)^{-1/2}, \\ W_{eb} &= W_b \cdot (2 - e_b^2)^{-1/2}. \end{aligned} \quad (6)$$

由于太阳电池银电极表面的粗糙度较大, 银电极表面更接近于漫反射太阳光的 Lambert 面, 如图 1(b) 所示. 因此, 引入比例因子  $\rho$  来表示电极粗糙度对光学损失的影响<sup>[25]</sup>. 假设金属银电极对太阳光的吸收系数为  $\eta_{\text{silver}}$ , 那么表征光学损失的银

电极的有效宽度比可以表示为

$$\begin{aligned} OL_f &= \eta_{\text{silver}} + (1 - \eta_{\text{silver}}) \cdot W_{ef}/W_f\rho, \\ OL_b &= \eta_{\text{silver}} + (1 - \eta_{\text{silver}}) \cdot W_{eb}/W_b\rho, \end{aligned} \quad (7)$$

其中, 银电极的吸收系数可以近似通过银电极的加权反射率  $R_{\text{silver}}$  来确定, 表示为

$$\eta_{\text{silver}} = 1 - R_{\text{silver}}. \quad (8)$$

太阳电池银电极的光学损失是包括氮化硅受光区域在内的电极吸收损失和反射损失之和与入射总光强的比值, 则分别由细栅和主栅遮光引起的光学损失表示为

$$\begin{aligned} P_{of} &= OL_f \cdot W_f/S_f, \\ P_{ob} &= OL_b \cdot W_b/S_b. \end{aligned} \quad (9)$$

因此, 细栅和主栅所引起的整体的前表面光学损失为

$$\begin{aligned} P_o &= \eta_{\text{silver}} W_f/S_f + (1 - \eta_{\text{silver}}) \cdot W_{ef}/S_f \\ &\quad + \eta_{\text{silver}} W_b/S_b \\ &\quad + (1 - \eta_{\text{silver}}) \cdot W_{eb}/S_b. \end{aligned} \quad (10)$$

结合银电极所引起的电学损失, 前表面电极总的功率损失表示为

$$P = P_e + P_o. \quad (11)$$

然后, 通过求解总功率损失的驻点就可以得到最优化的光诱导电镀增厚电极厚度值.

### 3 结果与讨论

本文实验采用电阻率范围为 1—3  $\Omega/\text{cm}$ , p 型太阳能级的 125 mm  $\times$  125 mm, 厚度为 200  $\mu\text{m}$  的单晶硅片作为实验样品. 通过多道清洗去除单晶硅片表面的颗粒物和金属离子后, 采用碱式表面织构化处理实验样品. 将样品分为三个部分, 使用三氯氧磷在管式扩散炉中进行热扩散, 得到的发射极方块电阻分别是 15  $\Omega/\square$ 、60  $\Omega/\square$  和 110  $\Omega/\square$ . 然后通过以下步骤进一步制备实验样品: 使用  $\text{CF}_4$  和  $\text{O}_2$  的等离子体干法去边; 去除表面残余磷硅玻璃; 间接法板式等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 折射率 2.06, 厚度为 80 nm 的  $\text{SiN}_x\text{:H}$  减反钝化薄膜; 丝网印刷背电极和背电场. 然后将之前三种样品的每一种再分为三个部分, 分别进行不同细栅宽度的丝网印刷, 其中丝网印刷的电极宽度分别为 70  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$  和 90  $\mu\text{m}$ , 而细栅线的间距为 2 mm. 然后将制备得到的全部九种实验样品放置在链式烧结

炉中热退火形成背表面的铝背场和正表面 Ohm 接触. 最后对每种实验样品进行多次光诱导电镀, 光诱导电镀实验原理如图 5 所示. 在光照条件下, 太阳电池会产生电子 - 空穴对, 而电子会被电场驱动到 n 型发射极上面的丝网印刷银电极上, 吸引电镀液中的 Ag 离子. 外电源的正极加载到银电极上以补充电镀液中的 Ag 离子, 同时电源负极加在太阳电池铝背场上以防止背面的 Al 溶解在电镀液里. 在 35 °C 的工作温度下, 光诱导电镀过程中的电流密度维持在 0.9—1.2 A/dm<sup>2</sup>.

实验采用美国光伏测量公司 (PV Measurements, Inc.) 的 QEX7 测试银电极的反射谱, 该设备采用氙弧灯作为太阳光的模拟光源. 测量反射谱时, 光线在银材料中的穿透深度表示为

$$\delta = \left( \frac{2}{\omega \mu \sigma} \right)^{1/2}, \quad (12)$$

其中,  $\omega$  代表入射光的角频率,  $\mu$  代表材料的磁导率,  $\sigma$  代表材料的电导率. 通过对穿透深度表达式的计算可知, 在测量反射谱 300—1100 nm 的波长范围内, 入射光在银电极中的穿透深度为纳米量级, 远小于微米量级的光诱导电镀增厚电极的厚度. 因此, 银电极的吸收系数仅决定于顶层光诱导电镀的

银电极, 并且与光诱导电镀增厚电极的厚度无关. 不同双层电极厚度样品的银电极吸收系数都可以由光诱导电镀电极区域的加权反射率来表征. 在光谱分布 AM1.5 G 的条件下, 对测试范围的银电极反射谱 (300—1200 nm) 进行加权反射率分析, 得到加权反射率  $R_{\text{silver}} = 54.69\%$ . 在每次光诱导电镀增厚电极后, 实验样品都在 25 °C, 1000 W/cm<sup>2</sup>, AM 1.5 的条件下, 使用 BERGER 测试仪测试太阳电池的 I-V 特性. 测试电池效率之后, 对实验样品进行 SEM 观测. 丝网印刷后光诱导电镀的双层电极优化分析实验的流程如图 6 所示.

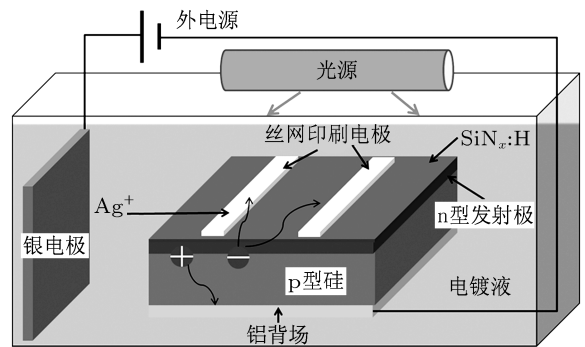


图 5 光诱导电镀实验原理图

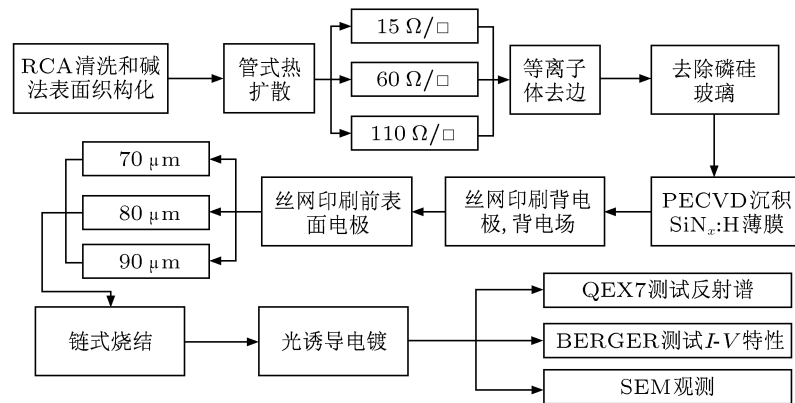


图 6 丝网印刷后光诱导电镀的双层电极优化分析实验流程图

对每种实验样品进行多次光诱导电镀并测试电池效率, 就可以得到该样品效率最佳点处所对应的光诱导电镀时间. 光诱导电镀后对不同实验样品的 SEM 观测, 可知光诱导电镀的速度约为 1 μm/min, 因此就可以通过电镀时间计算得到电镀增厚的电极厚度. 在不同的发射极方块电阻条件下, 表征最优化的光诱导电镀增厚电极厚度与丝

网印刷电极宽度关系的模拟和实验曲线如图 7 所示. 随着丝网印刷电极宽度的增大, 所需的最优化的光诱导电镀增厚电极厚度减小. 这是因为更大的底层丝网印刷电极所造成的光学损失更大, 影响了光诱导电镀所减小电学损失后对电池效率的提升, 最佳的光诱导电镀增厚电极也就更小, 由于同等条件下, 高发射极方块电阻样品的电学损失更大, 因

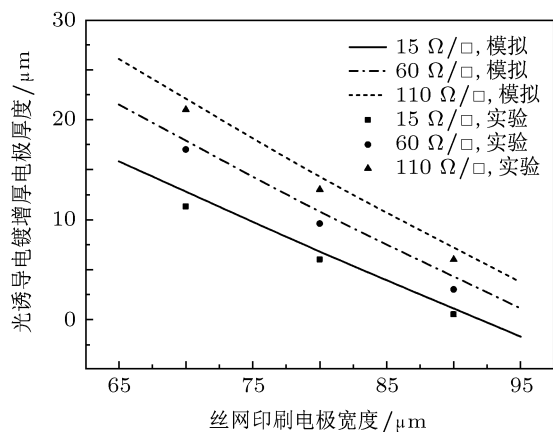


图7 最优化的光诱导电镀增厚电极厚度与丝网印刷电极宽度的关系

此光诱导电镀银电极更厚. 在同样丝网印刷电极宽度条件下, 所得到的最优化的光诱导电镀增厚电极厚度也就相对较大. 理论模拟所得到的最优化的光诱导电镀增厚电极厚度与实验上得到的最优化厚度符合良好, 只是理论模拟结果要略大于实验结果. 这主要是因为样品在多次的光诱导电镀实验过程中, 硅片部分表面会被略微沾污, 一定程度上抵消了光诱导电镀对太阳能电池效率的提升. 因此实验测

量上所得到的最优化的光诱导电镀增厚电极厚度要小于理论的最优值.

## 4 结语

本文通过 SEM 观测将双层电极的截面抽象为更接近于实际的半椭圆型, 建立了太阳电池前表面的双层电极模型, 理论分析了双层电极的电学损失和光学损失, 得到了前表面电极总的功率损失与光诱导电镀增厚电极厚度的关系. 实验对三种发射极方块电阻的样品, 采用了不同栅线宽度的丝网印刷, 然后进行了电极的光诱导电镀增厚. 通过  $I-V$  特性的测试, 得到了最优化的光诱导电镀增厚电极厚度与丝网印刷电极宽度的关系, 所得到的理论和实验结果符合良好. 作为一个抽象的理论模型, 双层电极模型仅与电极的截面几何特性、接触电阻、电极电阻率等因素有关, 而不涉及具体的电极制备技术. 因此, 本文的双层电极理论模型同样适用于基于喷墨印刷后光诱导电镀、气动印刷后光诱导电镀、二次丝网印刷等其他类型双层电极结构的太阳能电池.

- [1] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Liu J, Gu W 2011 *Chin. Phys. B* **20** 017801
- [2] Hua Z 2005 *Chin. Phys. B* **14** 2019
- [3] Glunz S, Mette A, Aleman M, Richter P, Filipovic A, Willeke G 2006 *Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference* Dresden, Germany, 2006 pp8–11
- [4] Mette A, Schetter C, Wissen D, Lust S, Glunz S, Willeke G 2006 *Proceedings of the 4th IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* Waikoloa, Hawaii, 2006 pp1056–1059
- [5] Pysch D, Mette A, Filipovic A, Glunz S 2009 *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **17** 101
- [6] Hyung Lee J, Hyun Lee Y, Yong Ahn J, Jeong J 2010 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95** 22
- [7] Erath D, Filipovic A, Retzlaff M, Goetz A K, Clement F, Biro D, Preu R 2010 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **94** 57
- [8] Lennon A, Utama R, Lenio M, Ho-Baillie A, Kuepper N, Wenham S 2008 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **92** 1410
- [9] Curtis C, van Hest M, Miedaner A, Kaydanova T, Smith L, Ginley D 2007 *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference* Milan, Italy, pp1039–1394
- [10] Shaheen S, Radspinner R, Peyghambarian N, Jabbour G 2009 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2996
- [11] Hörteis M, Mette A, Richter P, Fidorra F, Glunz S 2007 *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference* Milan, Italy, pp1039–1042
- [12] Mette A, Richter P, Hörteis M, Glunz S 2007 *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **15** 621
- [13] Hörteis M, Bartsch J, Binder S, Filipovic A, Merkel J, Radtke V, Glunz S 2010 *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **18** 240
- [14] Hörteis M, Glunz S 2008 *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **16** 555
- [15] Hyung Lee J, Hyun Lee Y, Yong Ahn J, Jeong J W 2011 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95** 22
- [16] Guo H, Zhang Y M, Zhang Y M 2006 *Chin. Phys.* **15** 2142
- [17] Wand Y Y, Guo H, Wang Y H, Zhang Y M, Qiao D Y, Zhang Y M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4470
- [18] Zhang L Z, Zhang Y M, Zhang Y M, Han C, Ma Y J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3490
- [19] Guo H, Zhang Y M, Qiao D Y, Sun L, Zhang Y M 2007 *Chin. Phys.* **16** 1753
- [20] Wang S G, Zhang Y, Zhang Y M, Zhang Y M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 017204
- [21] Huang J Y, Fan G H, Zhang S W, Niu Q L, Li S T, Cao J X, Su J, Zhang Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 047205
- [22] Liu G, Liu M, Wang H, Shang L W, Ji Z Y, Liu X H, Liu J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3530
- [23] Li C W, Zhu Y X, Shen G D, Zhang Y H, Qin Y, Gao W, Jiang W J, Zhou D S 2010 *Chin. Phys. B* **19** 097305
- [24] Blakers A 2009 *J. Appl. Phys.* **71** 5237
- [25] Woehl R, Hörteis M, Glunz S W 2008 *Adv. Optoelectron.* 1–7
- [26] Nguyen A, Fioramonti A, Morrissey D, Efstathiadis H, Zhouying Z, Haldar P 2009 *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Philadelphia PA, 2009 pp312–315

- [27] Meier D, Schroder D 2005 *IEEE Trans. Electron Dev.* **31** 647  
[28] Hilali M, Rohatgi A, To B 2004 *14th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules* Winter Park, Colorado, pp1–11  
[29] Wang N N, Yu J S, Zang Y, Jiang Y D 2010 *Chin. Phys. B* **19** 038602  
[30] Zhou Y H, Yang Z F, Wu W C, Xia H J, Wen S P, Tian W J 2007 *Chin. Phys.* **16** 2136  
[31] Liu X D, Xu Z, Zhang F J, Zhao S L, Zhang T H, Gong W, Song J L, Kong C, Yan G, Xu X R 2010 *Chin. Phys. B* **19** 118601

## Optimized analysis and experimental study for two-layer contact of crystalline silicon solar cells\*

Li Tao<sup>†</sup> Zhou Chun-Lan Liu Zhen-Gang Zhao Lei Li Hai-Ling Diao Hong-Wei  
Wang Wen-Jing

(The Key Laboratory of Solar Thermal Energy and Photovoltaic System, Institute of Electrical Engineering, CAS, Beijing 100190, China)

(Received 27 February 2010; revised manuscript received 30 May 2010)

### Abstract

Compared with single-layer contact, optimized two-layer contact of front side could diminish power losses distinctly and improve the electrical performance of crystalline silicon solar cell. In this paper, the optimized analysis and experimental study for two-layer contact of crystalline silicon solar cell are carried out. The model of two-layer contact is established by abstracting the cross-section of two-layer contact into semi-elliptical shape closer to the realistic situation according to the SEM observation. The electrical losses and the optical losses of two-layer contact are analyzed in theory. In combination with experimental screen-printed contact thickened by light-induced electroplating solar cell, the relationship between the optimum thickening contact thickness by light-induced electroplating and the screen-printed contact width is achieved in theory and experiment. The corresponding theory and experimental results are in good agreement with each other. Due to involving no concrete technology of contact preparation, the theoretical model of two-layer contact is generally applicable for many types of two-layer contact structures in consequence.

**Keywords:** light-induced electroplating, two-layer contact, electrical losses, optical losses

**PACS:** 88.40.jj, 88.40.H–, 88.40.–j

\* Project supported by the Main Direction of Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Science (Grant No. KGCX2-YW-382), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA05Z437).

<sup>†</sup> E-mail: litao@mail.iee.ac.cn