



高鹏 刘继伟 高文秀

## 0 引言

丝网印刷/快速烧结工艺是当今工业化大规模生产晶体硅太阳能电池普遍应用的成熟的金属化技术。

快速烧结工艺是将印刷在电池片的正面电极、背面电极以及背面场集中在一起通过快速烧结炉烧结完成其表面电接触。其工艺的基本设备为温度精确控制的快速烧结炉(温度上升速度 $>20^{\circ}\text{C}/\text{s}$ )，快速烧结理论在许多文献中有较详尽的描述。但是，工艺简单，生产成本低、便于大规模生产的丝网印刷/烧结工艺。所形成的金属-半导体接触电阻值却是光刻镀膜形成电极接触电阻的两个数量级。本文通过调节烧结工艺实验，使铝背面场、背面电极和正面电极厚膜欧姆接触的导电特性得以优化。

### 1 烧结工艺过程

图1是标准烧结工艺曲线图。从图中知道，快速烧结工艺一般包含四个阶段即：1. 燃烧有机物阶段；2. 升温阶段；3. 峰值温度区间；4. 降温阶段。

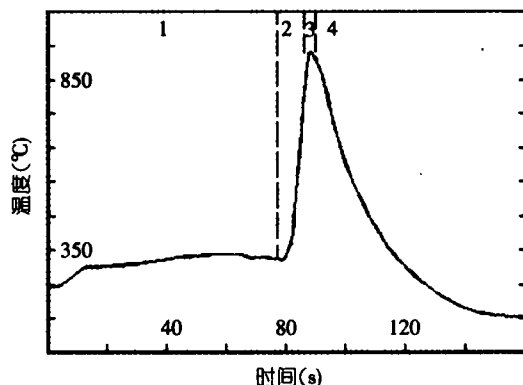


图1 标准烧结工艺温度随时间的变化曲线

燃烧有机物阶段的烧结温度一般设置在 $300^{\circ}\text{C}$ 左右。如果温度设置过高，则浆料中的有机物挥发速度过快，会造成金属颗粒之间疏松孔隙过多过大，使烧结后金属层内部以及金属-半导体接触之间的电阻过大；如果温度设置过低，会导致有机物燃烧不完全，也会带来同样的问题。

升温过程需要考虑的主要是对铝背面场和背面电极的烧结要有足够的温度和足够的时间。图2所示为不同方式的升温过程。2-A为迅速升温烧结工艺曲线图；2-B黑色实线为缓慢升温工艺曲线图。

峰值温度区间要注意的就是峰值温度的设定。峰值温度决定了烧结过程中银铝合金、硅铝合金当中金属原子的浓度，峰值温度对正面银电极和铝背场以及背面电极的烧结和电池片串联电阻和填充因子的影响都非常大。如果峰值温度设置过高，则会使正面电极烧穿，使串联电阻和填充因子下降，效率显著降低。

降温阶段要求匀速连续，不能有较大幅度的温度梯度变化，但也有在特殊的峰值温度后加上一个退火过程(如图2-A)此种烧结工艺据介绍对峰值温度设定过高而造成的过烧结具有很好的改善作用。

### 2 实验过程

#### 2.1 实验材料的准备

2.1.1 选择材料。实验材料选择电阻率在 $0.5\sim 3\Omega\cdot\text{cm}$ ，尺寸为 $125\text{mm}\times 125\text{mm}$ ，厚度为 $270\pm 30\mu\text{m}$ 的太阳能级直拉单晶硅片。

2.1.2 制绒。采用标准碱腐蚀单晶绒面工艺，出绒率在95%以上。

2.1.3 扩散。选择单面扩散工艺,扩散后方块电阻为  $45\pm 5\Omega$ ;少数载流子寿命在  $9\sim 13\mu s$  之间。

2.1.4 镀减反射涂层。采用等离子体增强化学气相沉积氮化硅层工艺形成表面减反射涂层,其厚度在  $80nm$  左右。

2.1.5 印刷电极。采用标准丝网印刷铝背面场,背面银铝电极和正面印刷银电极工业化生产流程。其中正面电极为  $45$  条  $175\mu m$  宽栅线,  $2$  条  $1.8mm$  宽的主线;背面场电阻率为  $4\sim 6\times 10^{-7}\Omega\cdot cm$ 。

2.1.6 烧结。实验选用的是 FERRO 33462 银浆; FERRO 3398 银铝浆; FERRO CN 53-102 铝浆;采用九温区快速烧结炉。

根据浆料厂商推荐的烧结工艺条件以及本次实验的工艺特点,我们以图 2-B 作为基础调节烧结工艺。

把实验片分成 6 组烧结,每组 20 片。

## 2.2 试验设计

在烧结温度调节过程中,通常是相关资料设定各温区的初始值。然后在其他温区温度不变的情况下,调节某一温区温度,找到其上极限值和下极限值。在该温区温度取相对理想数值后,再调节其他温区。这样依次调节各温区温度。较为复杂之处是各温区的交互影响,因此,调节烧结工艺需要具有较丰富的经验。

我们把准备好的 6 组实验片,按照下述不同的烧结温度进行烧结。

2.2.1 用图 2-B 所示曲线设置烧结工艺温度。烧结炉每个温区温度设定分别为:1 区  $300^{\circ}C$ , 2 区  $300^{\circ}C$ , 3 区  $300^{\circ}C$ , 4 区  $380^{\circ}C$ , 5 区  $390^{\circ}C$ , 6 区  $480^{\circ}C$ , 7 区  $620^{\circ}C$ , 8 区  $800^{\circ}C$ , 9 区  $910^{\circ}C$ 。

2.2.2 以 (2.2.1) 为基准,把 7 温区温度提高  $20^{\circ}C$ ,设置为  $640^{\circ}C$ 。

2.2.3 以 (2.2.2) 为基准,把升温阶段的起点温区(第五温区)温度提高  $40^{\circ}C$ ,设置为  $430^{\circ}C$ 。

2.2.4 以 (2.2.3) 为基准,把 4,5 温区的温度分别升为  $450^{\circ}C$ ,  $460^{\circ}C$ 。

2.2.5 以 (2.2.4) 为基准,把 9 温区的温度升到  $920^{\circ}C$ 。

2.2.6 以 (2.2.5) 为基准,把 9 温区的温度升到  $930^{\circ}C$ 。

## 3 实验结果分析

实验结果采用德国 Berger 公司的 SCLoad 三通

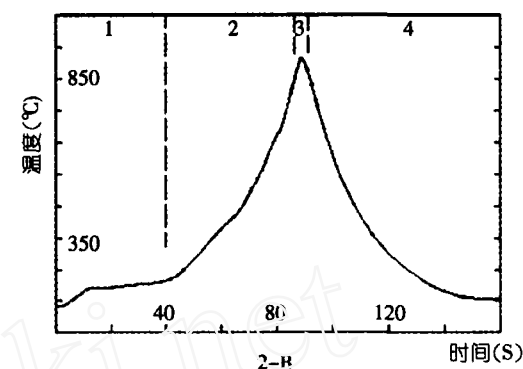
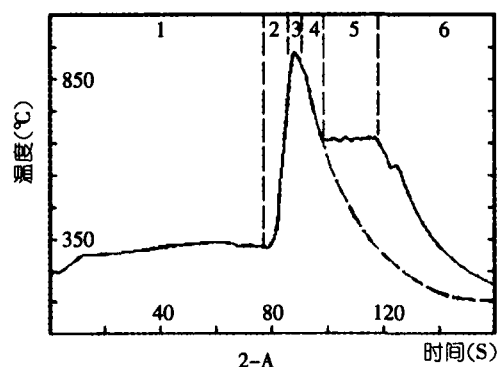


图 2 典型的烧结工艺温度曲线。

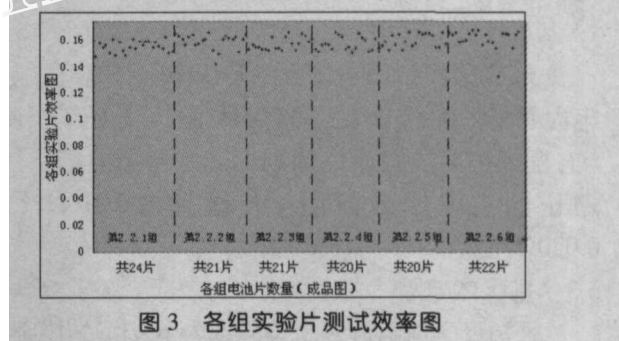


图 3 各组实验片测试效率图

道程控光伏电池片伏安曲线模拟测量仪进行测量 (IEC 904-1)。图 3 显示的是六组电池片烧结后效率分布图。

我们知道,太阳电池烧结的最主要的两个参数分别是串联电阻和填充因子(此处未对电池片的并联电阻进行分析,这对分析实验结果会略有影响)。

串联电阻可表示为:  $R_{sc} = r_m + r_{c1} + r_i + r_b + r_{c2} + r_{mb}$  (1)

$r_m$  是正面电极金属栅线电阻,  $r_{c1}$ 、 $r_{c2}$  分别是正面、背面金属半导体接触电阻,  $r_i$  是正面扩散层的电阻,  $r_b$  是基区体电阻,  $r_{mb}$  是背面电极金属层的电阻。

### 3.1 扩散薄层电阻引起的串联电阻 $r_i$

本实验所采用的是标准商用太阳电池正面电极设计(图 4)。在此前提下扩散薄层引起的串联电阻可以表示为:

$$r_i = \frac{R_{sq} \left( \frac{L}{W} \right)}{4m^2} \quad (2)$$

$R_{sq}$  为扩散层方块电阻;  $L$  为电池主焊接电极方向尺寸;  $W$  为电池细栅线方向尺寸;  $m$  为细栅线条数。我们在计算中, 不考虑光电导的影响。

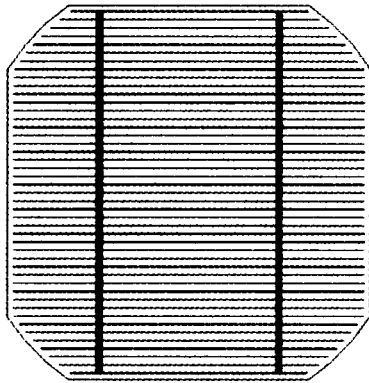


图4 正面金属电极图形

### 3.2 电极金属体电阻

金属体电阻可以表示为:

$$r_m = \frac{r_{sq} \left( \frac{l}{w} \right)}{2mn} \quad (3)$$

$r_{sq}$  为厚膜金属导体层的方块电阻, 厚膜印刷银电极通常为  $0.003\Omega/\square \sim 0.005\Omega/\square$ ;  $l$  为栅线长度;  $w$  为栅线宽度。对于铝背场形式的背面电极, ( $n$  为正面主电极线数目)  $r_{sq}$  通常为  $0.010\Omega/\square \sim 0.020\Omega/\square$ 。

### 3.3 基区体电阻

因为基区可以认为是电阻率为  $\rho$  的均匀掺杂半导体, 基区体电阻可以表示为:

$$r_b = \rho \frac{d}{L \times W} \quad (4)$$

其中,  $d$  为基区厚度, 约等于硅基片厚度; 基片材料电阻率选择的范围为  $0.5 \sim 3\Omega \cdot \text{cm}$ 。

### 3.4 烧结后欧姆接触电阻分析

根据理论计算, 本实验工艺条件下的  $r_m+r_i+t_b+r_{mb}$  约为  $4m\Omega$ 。这几个电阻值是跟烧结工艺关系比较小的。考虑到简化计算模型和光电导对计算所产生的误差,  $r_m+r_i+t_b+r_{mb}$  的实际值应该在  $3 \sim 4m\Omega$  之间。在本次实验的 2.2.5 和 2.2.6 组的串联电阻都在  $4m\Omega$  左右, 可见烧结后金属和半导体之间的欧姆接触电阻已经在小于  $1m\Omega$  的数量级内。

烧结的关键就是欧姆接触电阻。烧结很好的电

池片的  $r_{c1}+r_{c2}$  可以降低到  $10^{-4} \sim 10^{-5}\Omega$  数量级, 烧结不好的电池片  $r_{c1}+r_{c2}$  会大到十几毫欧至几百毫欧。本次实验在控制欧姆接触电阻方面, 获得了较为理想的结果。

### 3.5 填充因子

填充因子可近似表示为:

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} (1 - R_{sc}) \quad (5)$$

可见  $FF$  与电池片的开路电压和串联电阻有非常大的关系。由于我们在实验中获得了非常理想的串联电阻值, 也就获得了很高的填充因子。较高的填充因子还说明了电池片很低的漏电流和较高的并联电阻。

### 3.6 各组烧结结果分析

现在看表 1 中的结果。从表中可以见到, 开路电压和短路电流随烧结工艺不同而略有变化。而串联电阻和填充因子的变化就更明显, 从而直接导致电池效率的变化。

表1 实验结果中的重要参数

程序名称	开路电压 $U_{oc}/V$	短路电流 $I_{sc}/A$	串联电阻 $R_s/m\Omega$	填充因子 $FF/\%$	转换效率 $Eff/\%$
1	0.614	5.03	5.5	75.8	0.158
2	0.614	5.05	5.1	76.4	0.159
3	0.616	5.01	4.9	77.0	0.160
4	0.616	5.02	4.9	76.6	0.159
5	0.615	5.07	4.3	77.9	0.163
6	0.613	5.01	3.9	77.4	0.160

从第 1 组到第 4 组, 随着升温阶段温度的提高, 电池背场烧结更充分; 从第 3 组和第 4 组的对比看出, 再继续增高升温阶段的温度, 也不会导致电池参数的改善。

第 5 组和第 6 组电池片的串联电阻则有非常大的下降, 这要归功于烧结峰值温度的升高。对比第 5/6 组还可以看出来, 第 6 组电池参数除了串联电阻继续降低之外, 其他参数都变得更差, 出现这种情况的原因是峰值温度过高而导致的正面银电极部分烧穿。

分析以上烧结工艺, 第 5 组烧结工艺温度设置是最为理想的。因为与最初工艺设定相比, 串联电阻已经从  $5.5m\Omega$  降到  $4.3m\Omega$  左右。从而获得了好的填充因子和转换效率。

## 4 结论

本文用实验说明烧结工艺调节方法, 需要注意



梅开乡

如何提高光电池的工作效率? 这是人们利用太阳能发电十分关注的技术关键, 本文提出了太阳强光“自动跟踪”方案。经实践检验, 采用跟踪装置后, 电池板的平均输出能量提高 30% 以上。

### 1 “自动跟踪”装置的原理

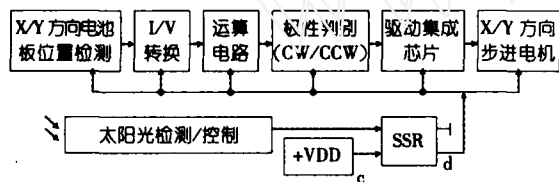


图1 “自动跟踪”装置原理框图

如图1所示, 自动跟踪装置主要分为三路。第一路的功能是区分昼夜有无太阳光。夜晚太阳下山或阴天光线很微时, 太阳光检测信号通过转换, 输出控制信号使电池板面向东方太阳初升的位置, 然后使固态继电器 SSR 动作切断“自动跟踪装置”的电

源以节省电能。反之, 固态继电器 SSR 接通, 自动跟踪装置供电进入工作状态。第二路(南北方向跟踪); 第三路(东西方向跟踪)电路, 即由太阳光光线检测、I/V 转换、减法运算、位置误差放大、误差正负判别、驱动集成电路、多谐振荡器、步进电机等组成。其功能是使电池板从早到晚始终跟踪太阳位置的变化, 使光伏电池一直接受到最强的太阳幅射。

### 2 太阳光线检测与蓄电池欠压状态保护电路

太阳光线检测与蓄电池欠压状态保护电路如图2所示。图中  $E_2$  为蓄电池, SSR 为固态继电器, 电路用于自动控制蓄电池  $E_2$  向负载“自动跟踪装置”的供电, 起到节能降耗的效果。图中 CMOS 与非门芯片 CC4011、时基芯片 MC17555 的静态功耗  $P_s \leq 0.1\text{mW}$ , 属于微功耗芯片。夜间或阴雨的白天, 光敏电阻  $R_c$  因无光或只受弱光照射时呈高电阻状态(例 MG45 型光敏电阻的暗阻为  $100\text{k}\Omega$ , 亮阻为  $5\sim$

要同时保证背面和正面烧结充分。在工艺调节过程中, 我们大多采用其他温区温度不变, 调节某一温区温度, 然后观察烧结后电池片性能, 再做相应调节的方法。还需要注意的是, 后一温区的温度一般不低于前一温区的温度。经过我们的优化, 很好地把串联电阻的平均值这一关键参数降低到  $4\text{m}\Omega$  左右, 并把平均转换效率稳定在 16.3% 左右。

### 5 致谢

在这里, 我要感谢中电电器(南京)光伏有限公司给予的大量帮助和支持; 感谢澳大利亚新南威尔士大学博士、中电电气(南京)光伏有限公司总工程师赵建华先生, 中电电气(南京)光伏有限公司副总工程师张凤鸣博士及张忠文的指导。(参考文献编者略)

作者单位: 厦门大学机电工程系