

晶体硅太阳能电池烧结匹配性研究

摘要：良好的烧结能够极大地提升太阳能电池的转换效率。通过理论分析太阳能电池烧结后各参数的变化情况，预测烧结的状态以及烧结的调节方向，进而通过实验来验证理论分析，从而得到工业生产中晶硅电池烧结匹配优化方法。通过不断对烧结的优化，从而达到了改善烧结效果，提升电池片功率的目的。

丝网印刷和快速烧结由于其生产相对方便和迅速高效，是当今工业生产太阳能电池大规模应用的一种成熟工艺。

烧结的目的就是为了把印刷到硅片上的电极在高温下烧结与硅片形成良好的欧姆接触，从而更好地收集电池片表面由于光生伏特效应所产生的电流。电池片常规的生产工艺流程为：表面预清洗 化学腐蚀制作绒面 扩散制结 等离子体刻蚀去边 去磷硅玻璃 镀减反射膜 丝网印刷 烧结 性能测试，其中烧结为电池片生产的核心环节之一。

烧结的好坏直接影响电池片的几项重要参数：串联电阻、并联电阻和填充因子，从而决定了电池片的好坏。由于很多厂家所用的设备以及工艺条件的不同，以及印刷浆料的不断更新，每个厂家都需要根据自身的实际情况，在实践中不断调整和修改，以达到更好的工艺匹配。本文通过理论分析串联电阻、并联电阻以及填充因子对于烧结效果的判断，并以实验来验证这些判断指标，进而得到各参数与烧结温度的相互关系。这对于工业生产过程中的烧结匹配性调节有一定的指导意义。

1 烧结原理

烧结原理就是当金属材料和晶硅加热到共晶的温度时，晶硅的原子会以一定的比例扩散到金属当中，而扩散的晶硅原子的数量取决于金属的温度以及金属体积。而此时的晶硅原子融入金属的状态就被称之为合金系统。此后降低温度，融入到金属中的硅原子会重新以固态的形式结晶出来，这样就在金属和晶硅之间便形成了一层外延层。如果这个外延层含有与原先晶体相同类型的杂质，金属与晶体硅便形成了欧姆接触。

每一批次硅片由于其杂质掺入的比例以及深度的不同，每批硅片都有其最佳的烧结点，当温度过高或者过低，都不能达到我们理想的烧结效果。欠烧时，欧姆接触没有完全形成，串联电阻便会偏大，填充因子偏低；过烧时，硅片表面的扩散磷在高温下被驱赶到硅片的深处，而银浆中的磷不能形成充分的磷源补充，硅片表面的杂质浓度就会下降，接触电阻就会增加，同时银硅合金也会消耗过多的银，此时的银硅合金层相当于隔离层，阻止了载流子的输出，也会增加接触电阻，降低填充因子。

因此通过考察接触电阻的好坏以及p-n结特性我们便可以判断出烧结情况的好坏。结合并联电阻以及反向电流的考察，我们便可以大体判断出烧结的调节方向，过烧时会导致电极烧穿，更多的杂质驱散到p-n结附近，增加了局部漏电的几率，这时所表现出来的特征就是并联电阻偏小，反向电流偏大，同时温度过高时表面复合几率增大，短路电流也会相应减小。因此烧结匹配性的判断主要是对串联电阻中的接触电阻、并联电阻、填充因子、反向电流以及短路电流的综合判断。

2 实验

2.1 样品

实验选用面积为156mm × 156mm,晶向为<100>的p型单晶硅片作为实验样品，其电导率为0.5 Ω·cm ~ 2.0 Ω·cm，原始硅片厚度约200 μm。实验样品共分为11组，每组样品20片。

2.2 实验步骤

实验步骤如下：清洗制绒 扩散制结 刻蚀 去磷硅玻璃 镀减反射膜 印刷 高温烧结 测试统计平均数据 调节烧结工艺 分析结论。

(1) 清洗制绒，采用低浓度的碱溶液腐蚀制备绒面，降低硅片的反射率。

(2) 扩散制结，使用液态POCl₃作为磷源在高温下扩散形成p-n结，使用semilab公司的方阻测试仪SHR-1000测试方阻，控制方阻范围53 Ω / cm² ~ 57 Ω / cm²。

(3) 采用CF₄和O₂的等离子体进行硅片边缘刻蚀。

(4) 用适当的浓度的HF酸去除附着的磷硅玻璃。

(5) 采用常规的工艺在硅片表面淀积一层SiN_x:H减反射膜，使用semilab公司的LE-100PV椭偏仪测量薄膜的厚度以及折射率，显示为膜厚75nm，折射率为2.01。

(6) 印刷和烧结：用Baccini丝网印刷机对硅片进行电极印刷，并用Despatch烧结炉以20片为一组，根据烧结结果对烧结炉进行反复调节。这里主用采取控制变量法，先控制烧结炉1区~8区温度不变，调节烧结炉的9区得到一个相对好的烧结点，然后控制1区~7区以及9区温度不变，调节8区温度，以获得最佳匹配温度。其中1区~7区在整个实验过程中未进行调节，为常见的陡坡式烧结曲线，其温度设置见表1。

表1 1区~7区温度设置

温区	1区	2区	3区	4区	5区	6区	7区
温度 θ / $^{\circ}\text{C}$	340	350	380	510	550	620	660

(7) 保持8区温度不变，设为820，调节9区温度得到的结果见表2。

(8) 保持9区温度不变，设为925，调节8区温度得到表格3的结果。

表2 8区温度设为820 °C

九区温度 θ /°C	910	915	920	925	930	940
开路电压 U_{oc} /V	0.627 0	0.627 1	0.627 8	0.627 9	0.626 0	0.625 9
短路电流 I_{sc} /A	8.633	8.676	8.665	8.702	8.651	8.634
串联电阻 R_s /mΩ	4.087	3.770	3.692	3.660	3.430	3.790
并联电阻 R_{sh} /Ω	100.75	174.00	158.28	148.57	213.46	213.79
填充因子 FF	77.33	77.63	77.79	77.89	77.97	77.57
转换效率 η /%	17.53	17.67	17.81	17.81	17.68	17.55
接触电阻 R_c / (mΩ · cm ²)	47.5	37.2	18.8	9.7	11.7	9.8

表3 9区温度设为925 °C

八区温度 θ /°C	790	795	800	805	810	820
开路电压 U_{oc} /V	0.627 1	0.627 5	0.629 0	0.627 9	0.627 4	0.627 9
短路电流 I_{sc} /A	8.651	8.675	8.692	8.677	8.687	8.702
串联电阻 R_s /mΩ	2.779	2.850	2.975	3.020	3.157	3.660
并联电阻 R_{sh} /Ω	187.16	178.81	214.75	165.50	206.33	148.57
填充因子 FF	78.79	78.87	78.83	78.65	78.39	77.89
转换效率 η /%	17.88	17.97	18.04	17.94	17.88	17.81
接触电阻 R_c / (mΩ · cm ²)	13.5	13.1	6.2	6.9	7.5	9.7

3数据及分析

实验的数据结果是由pss10太阳能光伏模拟器测试得出，以20片的平均数据为参考，避免了单片的波动性造成的数据失真。对比表2和表3的烧结数据，我们不难发现 U_{oc} 、 I_{sc} 、 R_s 、 R_{sh} 、 FF 和 η 在不同的烧结温度下，都有了改变。尤其是 R_s 、 R_{sh} 、 FF 以及 η 变化比较明显。

实验过程中，我们控制其余8个区域，分别向过烧以及欠烧的方向调节，以期找到最为合适的烧结点。为方便数据的分析，我们将烧结的数据调整为温度逐渐升高的过程。

分析九区的烧结数据，如图1所示，我们发现随温度的持续升高，电池背场烧结的更充分，电池的串联电阻持续得到改善，填充因子增大，效率提高。继续升高温度，除了串联电阻有了较大的下降以及填充因子有所上升外，其他的参数都变得更差，继续调高温度，电池的各项参都变得恶化。而串联电阻在第5组温度下得以改善，很有可能是温度较高，正面银电极部分烧穿，导致的串阻大幅度下降。而填充因子可以看成是串联电阻的函数，如公式所示。

$$FF = \frac{U_{oc} - \ln(U_{oc} + 0.72)}{U_{oc} + 1} (1 - R_s)$$

式中：FF为填充因子；Uoc为开路电压；Rs为串联电阻。

由公式，当串联电阻有较大下降时，FF有一个改善的过程。分析以上的烧结过程，当8区温度保持不变时，第4组数据烧结工艺温度设置是最为理想的。与最初的烧结工艺相比，效率提高了0.28%。

由公式，当串联电阻有较大下降时，FF有一个改善的过程。分析以上的烧结过程，当8区温度保持不变时，第4组数据烧结工艺温度设置是最为理想的。与最初的烧结工艺相比，效率提高了0.28%。

由公式，当串联电阻有较大下降时，FF有一个改善的过程。分析以上的烧结过程，当8区温度保持不变时，第4组数据烧结工艺温度设置是最为理想的。与最初的烧结工艺相比，效率提高了0.28%。由公式，当串联电阻有较大下降时，FF有一个改善的过程。分析以上的烧结过程，当8区温度保持不变时，第4组数据烧结工艺温度设置是最为理想的。与最初的烧结工艺相比，效率提高了0.28%。

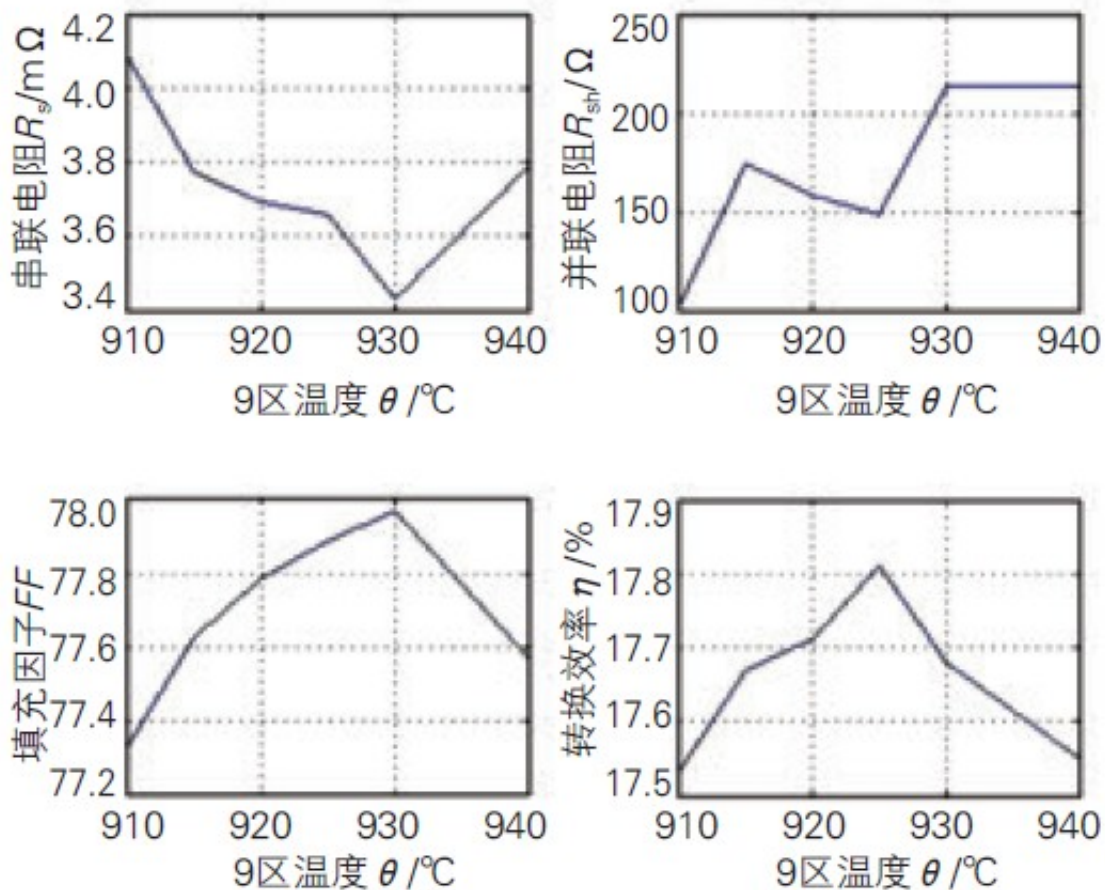


图1 9区温度调节各参数改变情况

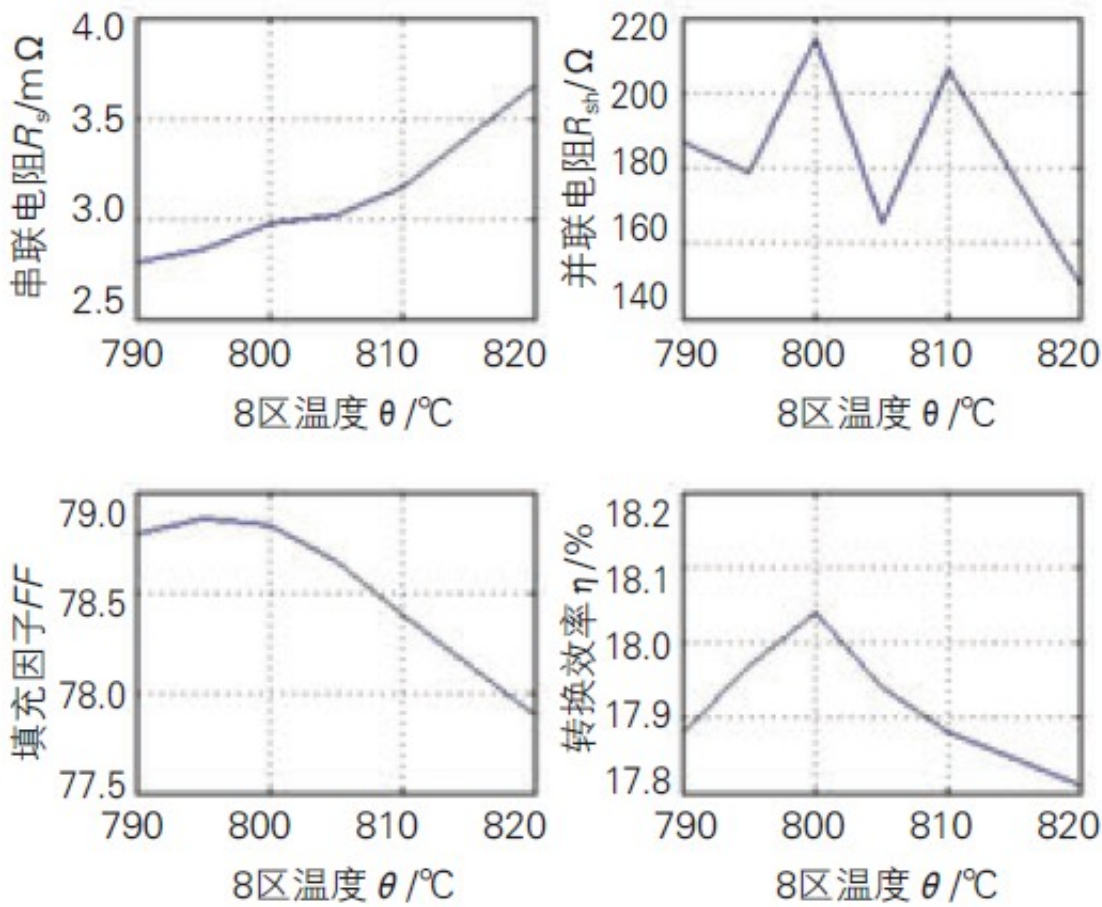


图2 8区温度调节各参数改变情况

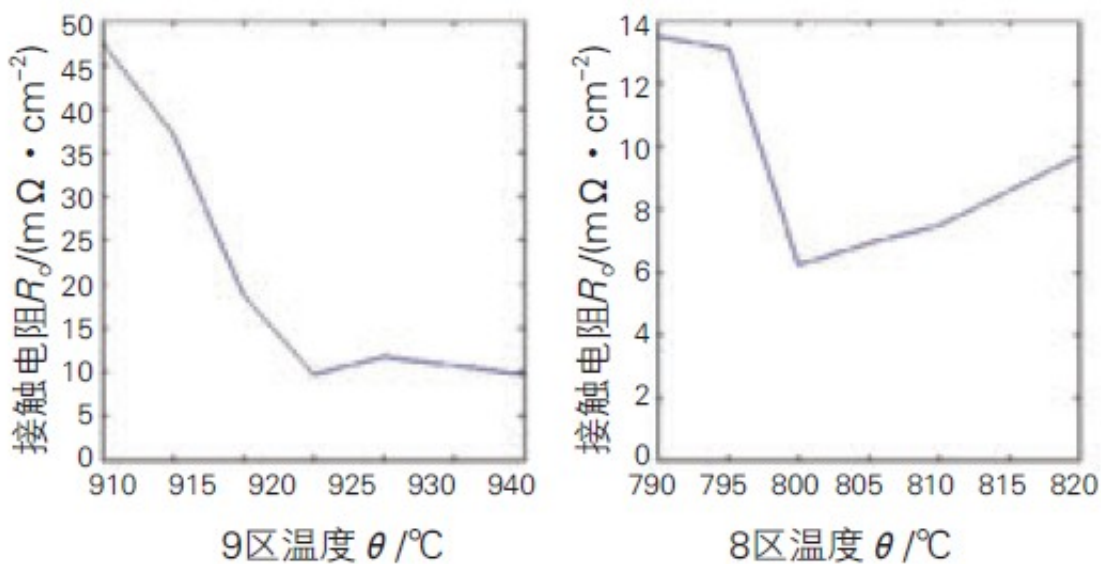


图3 温度改变时接触电阻的改变情况

经过反复调试, 得到最佳的烧结温度见表4。

表4 最佳匹配温度

温区	1区	2区	3区	4区	5区	6区	7区	8区	9区
温度 $\theta / ^\circ\text{C}$	340	350	380	510	550	620	660	800	925

在此烧结温度下，我们又进行了多次试验，获得了较好的重复性。而在此温度下，效率相对于初始的烧结工艺有了0.51%的改善。这说明以上的分析是正确的。

4结论

通过控制变量的方法，分别调节8区以及9区的温度，得到了一个相对较好的烧结工艺，在得出此工艺的过程中，我们结合理论以及通过对实验结果的分析，得出以下结论：

- (1) 电池的串联电阻与烧结工艺的匹配密切相关，一般好的烧结工艺，串联电阻会相应地降低；
- (2) FF与串联电阻密切相关，一般随着串联电阻的减小，FF会相应地增大；
- (3) 一般过烧与欠烧都存在串联电阻偏大的现象，此时应该结合并联电阻和反流进行判断，一般过烧都存在并联电阻降低，反流偏大的现象；
- (4) 接触电阻的改善能够很好地预测烧结效果的改善，在不破坏p-n结的情况下，接触电阻越小，则烧结效果越好；
- (5) 电池片由欠烧向最佳烧节点调节的过程中，串联电阻持续降低，刚过了最佳点以后，串联电阻依然会降低，此时需要结合效率以及反流来判断；
- (6) 实在无法判断此时的烧节点，可以通过控制变量法，对一个温区进行单向变动，观察烧结效果，以判断温度调节的方向；

本文从理论分析以及实验验证的角度获得了一个较好的烧结工艺，对工业生产中的烧结匹配有一定的指导意义。（杨达伟，高华，杨乐 上海超日太阳能科技股份有限公司，上海201406）

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/58711.html>