

· 光电器件与材料 ·

## 高方阻密栅电池发射结方阻的优化

高 华, 黄其煜

(上海交通大学微电子学院, 上海 201406)

**摘要:** 主要介绍了晶体硅太阳能电池光电转换效率的工艺优化, 特别是对高发射结方阻方面, 以及后道工序中如何使之适应高方阻工艺。在高方阻方面主要采用了深结高方阻, 这主要是从工艺稳定性方面考虑。通过一系列工艺的优化及大量实验, 获得了高达 635 mV 的开路电压, 5.817 A 的短路电流, 均值 18.67% 的电池效率。

**关键词:** 高方阻发射结; 晶体硅电池; 转换效率

中图分类号: TM911.11

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-01-0018-07

## Optimum Design of High Sheet Resistance Dense Grid Cell Emitter Resistance

GAO Hua, HUANG Qi-yu

(School of Microelectronics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201406, China)

**Abstract:** Technology optimization of electro-optical conversion efficiency of crystalline silicon solar cell is introduced. High emitter sheet resistance and how to adapt to the technology of high sheet resistance in following procedures are introduced especially. Considering of technology stability, the method of deep PN junction high sheet resistance is mainly used on the area of high sheet resistance. The open circuit voltage of 635 mV, the short circuit current of 5.817 A and the average cell efficiency of 18.67% have been achieved through a series of technology optimizations and a lot of experiments.

**Key words:** high sheet resistance emitter; crystalline silicon solar cell; conversion efficiency

太阳能电池片的高方阻发射结是实现高效太阳能电池的有效途径之一。利用低浓度浅结可以显著地降低太阳能电池片表面的少数载流子复合速度, 提高短波段的光谱响应。但是浅结扩散工艺对后道工序制成尤其是烧结、浆料等的要求、工艺稳定性都是极大的挑战, 文中试图从高方阻制备的另外一个方向: 高方阻低浓度深结开始, 在维护工艺稳定性及兼容性的方向进行改善提高。

高方阻能够产生较大的短路电流主要是两点: (1) 高方阻低浓度深发射结, 可以提高电池的短波响应, 进而提高短路电流; (2) 和普通方阻相比, 高阻的表面掺杂浓度要低一些, 表面复合导致的暗电流也会减小, 因此短路电流也会提高。

### 1 原 理

太阳电池的核心是 P-N 结, 结的质量对电池的光电转换效率起到了决定性的作用。光在进入硅片表面后, 硅片的光吸收系数随着其进入硅片的深度成指数型衰减, 特别是表面掺杂浓度较高情况下, 表面复合速率高, 导致越靠近电池片表面, 光生载流子的收集几率越低, 特别是能量较高的光在表层产生的空穴不能达到势垒区, 将大大降低入射光的利用率<sup>[1-2]</sup>。

对于高方阻发射结电池, 其表面钝化非常重要, 二极管饱和电流密度是衡量载流子复合对晶体硅电池效率影响的重要指标, 当忽略串联电阻和并联电

收稿日期: 2012-12-27

基金项目: “上海市闵行区校企合作技术创新专项” (#2011MH060) 支持

作者简介: 高华 (1982-), 男, 四川人, 硕士, 研究方向为硅太阳能电池。

阻的影响,多二极管模型中,电池的电流-电压关系可以表示如下

$$J(V) = \sum_i J_{0,i} [\exp(\frac{qV}{m_i kT}) - 1] - J_L = \frac{J_{rec} - J_L}{J_{rec} - J_L} \quad (1)$$

其中,  $J_{rec}$  和  $J_L$  分别为复合电流、光生电流密度;对于不同的复合通道  $i$  都有饱和电流  $J_{0,i}$  和理想因子  $m_i$  对应。对于理想的复合过程,理想因子  $m_i = 1$ ,其适用于晶体硅表面复合和体复合。空间电荷区的复合有:  $m < 2$ ,在高效电池中通常忽略。在单二极管模型中  $m = 1$ ,从而有

$$J_{rec}(V) = J_0 [\exp(\frac{qV}{kT}) - 1] = J_0 \frac{pn - n_i^2}{n_i^2} \quad (2)$$

断路电压条件下有:  $J_{rec}(V) = J_L$ , 开路电压 ( $V_{oc}$ ) 可以表示为

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln(\frac{J_L}{J_0} + 1) \quad (3)$$

饱和电流密度 ( $J_0$ ) 包括发射结饱和电流 ( $J_{oe}$ ) 和基区饱和电流密度 ( $J_{ob}$ ), 即  $J_0 = J_{oe} + J_{ob}$ ;

基区饱和电流密度 ( $J_{ob}$ ) 包括体复合和基区表面复合,低注入水平条件下 ( $\Delta n \ll N_{A/D}$ )

$$J_{ob} = \frac{qDn_i^2}{L_{eff} N_{A/D}} \quad (4)$$

$$L_{eff} = L_b \frac{1 + SL_b/D * \tanh(W/L_b)}{SL_b/D + \tanh(W/L_b)} \quad (5)$$

对于发射结饱和电流密度 ( $J_{oe}$ ), 由于扩散曲线 (Diffusion Profile) 的不均匀性,  $J_{oe}$  无法直接通过模拟计算得到,但是少数寿命可以间接反映 ( $J_{oe}$ ) 值的大小。

由于  $J_{oe}$  包括了发射结表面复合速度和发射结体内复合,而发射结表面复合速度很大程度上依赖发射结表面钝化质量。为了区分发射结体复合和发射结内部复合需要考虑到载流子的传输及复合机制、掺杂浓度相关的发射结寿命、载流子迁移率、以及高掺杂引起的能带收缩效应<sup>[3-5]</sup>。由于发射结掺杂曲线的不均匀性,这始终是一个还没有解决的难题。

对于高效晶体硅电池而言,发射结掺杂以及发射结表面钝化非常重要,发射结体内的复合,可以通过发射结体扩散常数将其进行如下分区。

(1) 发射结体内载流子扩散长度小于结深 ( $L_{Emitter} < L_{depth}$ ): 此时,光生电子/空穴对在到达PN结前就已经被复合,从而发射结体复合是发射结饱和电流的主要贡献,而发射结表面复合的影响则比

较小。

(2) 发射结体内载流子扩散长度等于结深 ( $L_{Emitter} = L_{depth}$ ): 此时,发射结体内的复合和表面复合都是需要考虑的。

(3) 发射结体内载流子扩散长度大于结深 ( $L_{Emitter} > L_{depth}$ ): 此时,光生载流子在发射结体内的复合可以忽略不计,而发射结表面复合电流主要由发射结表面复合决定。

低注入条件下 ( $\Delta n < N_{dop}$ ), 俄歇复合正比于掺杂浓度  $N_{Dop}^{1.65}$ , 硼/磷原子在晶体硅中的固溶度极限: 硼原子在晶体硅中的固溶度极限为:  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ; 磷原子在硅中的固溶度极限为:  $1.3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , 从而载流子的扩散长度极限为:  $10^{-2} \mu\text{m}$ 。高掺杂区对高效电池的效率影响非常大,尽管这发射结表面区域厚度只有发射结结深 ( $0.3 \mu\text{m}$ ) 的1%左右。

图1是P型衬底中磷扩散浓度分布曲线图,由扩散方阻和薄层电阻率、扩散结深的关系可知:方块电阻随着电阻率的增加而增加,随着扩散结深的增加而减小。通常扩散薄层的电阻率(由掺杂浓度所决定)和结深主要由扩散温度、时间及扩散  $N_2$  气流量等因素的影响,具体关系如表1所示。

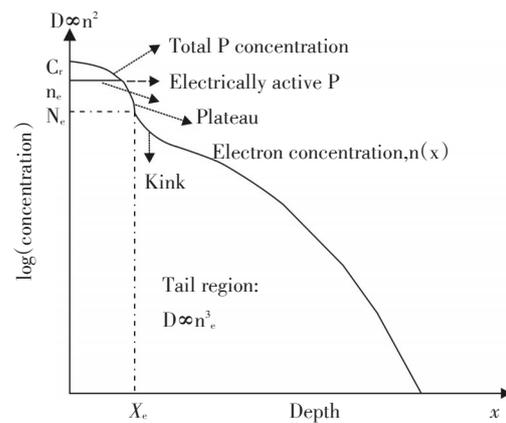


图1 P型衬底中磷的扩散曲线  
(According to Fair and Tsai, 1977)

为了降低高能量的光在硅片表面的复合,高方块电阻发射结电池通常采用高方阻扩散工艺,这可以增加电池片的短波响应,进而提高电池片的短路电流;和普通方阻的电池工艺相比,高方阻的表面掺杂浓度可以适当降低,相应表面复合的暗电流也会有所减少,因此电池片的短路电流和开路电压将有所提高。

收集太阳能电池所产生的电流,金属电极是必不可少的部分。顶电极的优化设计目的是通过改良电

表1 晶硅电池发射结影响因素

Parameters	扩散温度( $T$ )	扩散时间( $t$ )	扩散 $N_2$ 流量(sccm)
PN表面浓度	发射结表面浓度随扩散温度的增加而增加	发射结表面浓度随扩散时间的增加而增加	发射结表面浓度随 $N_2$ 流量的增加而增加
PN结结深	发射结结深随扩散温度增加而增加	发射结结深随扩散时间的增加而增加	发射结结深随 $N_2$ 流量的增加而增加

流收集来减少由于串联电阻和电池的遮光面积而造成的损失。在电池栅线设计中,扩散薄层的横向电流损失是主要的,薄层电阻的重要性之一,在于它决定了顶电极栅线之间的理想间隔。

对于细栅线的最佳尺寸,考虑当栅线的间距趋于无限小,以致横向电流损耗可以忽略不计,细栅线结构设计为最佳值,其表达式为<sup>[6-8]</sup>

$$\frac{W_F}{S} = B \sqrt{\left( \frac{\rho_{smf}}{m} + \frac{\rho_c}{B^2} \right) + \frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \quad (6)$$

从而最小电阻率表达为

$$\rho_{min} = 2B \sqrt{\frac{\rho_{smf} + \frac{m^* \rho_c}{B^2} J_{mp}}{m}} \quad (7)$$

## 2 实验

提高效率、降低成本是光伏电池厂商研发的主要目标,高效晶硅电池经过多年的工艺及技术优化,已经达到了一定的技术水平,但其主要方向还是在如何提升电池短波响应、改善电池长波吸收,进一步优化正面发射结欧姆接触、逐步提升电池性能<sup>[9-12]</sup>。对于改善电池短波响应,高方阻发射结是一种行之有效的办法,但是这种方案的有效实施,需要后续众多工艺的协调,才能使其优势得到充分发挥,论文着重从以下几个方面开展研究。

### 2.1 不同方阻对电池性能的影响

结合现有设备工艺条件,逐步优化发射结扩散工艺及方阻大小,得到兼容于现有常规生产设备的扩散工艺。

图2是发射结方阻及正面栅线匹配对电池 $V_{oc}$ 的影响,从图中可以看出,在电池其他制备工艺一定的条件下,在不考虑栅线图形影响的条件下,随着发射结方阻从 $57 \Omega/\square$ 上升到 $68 \Omega/\square$ 左右,电池开路电压由 $627 \text{ mV}$ 上升到 $634 \text{ mV}$ , $V_{oc}$ 均值有着显著的

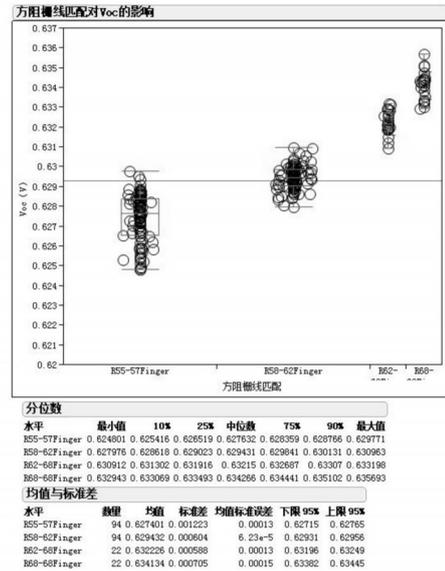


图2 不同方阻对电池 $V_{oc}$ 的影响

提升。

图3是在后道工艺相对稳定相同的条件下,电池发射结方阻及栅线图形对电池串联电阻的影响,从图中可以看出,发射结方阻由 $55 \Omega/\square$ 增加到 $68 \Omega/\square$ 以后,电池的串联电阻均值从约为 $4.89 \text{ m}\Omega$ 提升到

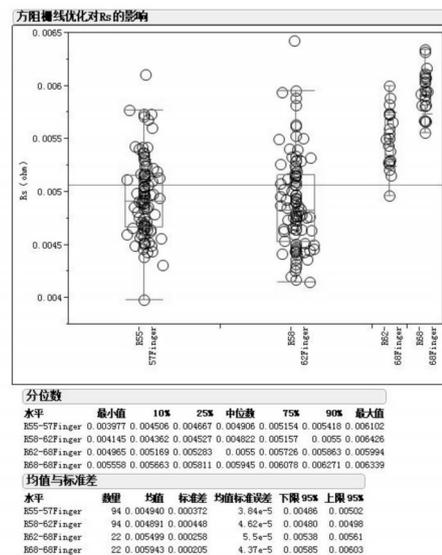


图3 不同方阻对电池 $R_s$ 的影响

5.9 mΩ。这就是说,在发射结方块电阻由 55 Ω/□增加到 68 Ω/□,晶体硅电池的串联电阻没有太大的增加,这就是我们想要的实验结果,产生这一现象的主要原因是,在电池方块电阻增加的同时,125 单晶电池的表面栅线由 57 根增加到了 68 根。

图 4 是单晶 125 电池,在使用相同正电极浆料,发射结方阻与正面栅线匹配条件下的电池的填充因子  $FF$ 。从图中可知,虽然发射结方阻增加,但是由于在高方阻条件下,电池正面电极栅线根数也随着增加,从而最终电池的  $FF$  与  $R_s$  与方阻电池相近,从而电池  $FF$  在高方阻条件下,没有显著降低。

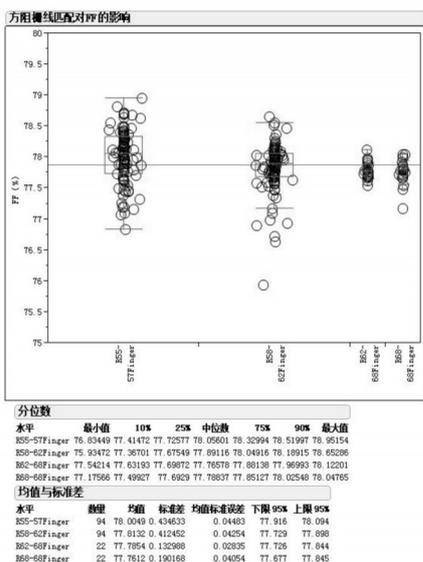


图 4 不同方阻对电池  $FF$  的影响

图 5 是 125 单晶电池条件下,发射结方阻及栅线对电池短路电流的影响,从图中可以看出,随着方块电阻的增加,由于电池表面掺杂浓度的降低和表面

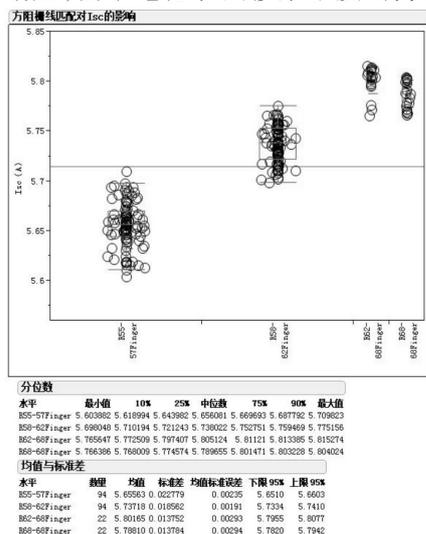


图 5 不同方阻对电池  $I_{sc}$  的影响

复合速度的有效降低,使得电池短路电流有了显著的提升。电流从 57 栅线时候的 5.65 A 提升到 68 根栅线时候的 5.8 A 左右。

图 6 是发射结方阻与栅线匹配,电池正面使用相同正电极浆料条件下,125 单晶电池的效率统计。从图中可以看出,随着发射结方块电阻的增加,125 单晶电池不管是效率本身还是电池效率的均匀性,都显示高方阻电池比常规电池性能有着显著提升。

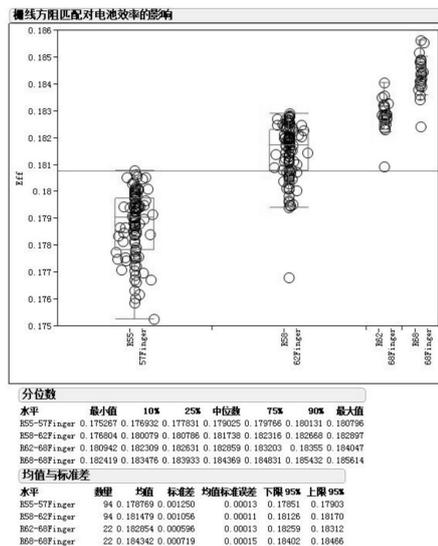


图 6 不同方阻对电池效率的影响

在上述不同方块电阻条件下,测试了最后得到电池的外部量子效率 (external quantum efficiency, EQE) 曲线,具体详见图 7。从电池量子效率曲线可知,在短波 400 nm 以前,高方阻电池短波响应要显著优于常规方阻电池。而在长波方面,高方阻电池和常规方阻电池有着相近的光谱响应。

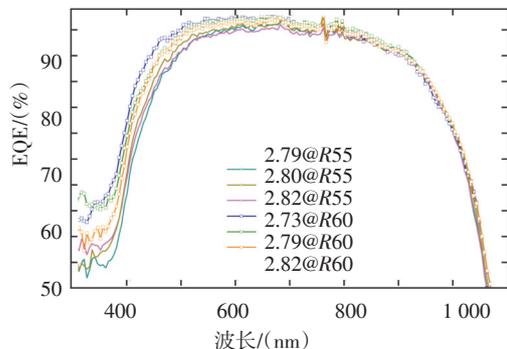


图 7 125 单晶电池不同功率档电池 EQE 数据

## 2.2 68 栅线下发射结方阻的优化

经过上述大量实验及实验结果分析,单晶 125 发

射结电池表面正栅线在68根时,电池有着较优的电池  $V_{oc}$  和短路电流,即较优的电池性能参数和效率。

图8是方阻变化对电池  $V_{oc}$  的影响,从图中可以看出,在发射结方阻小幅变化的条件下,最终电池的  $V_{oc}$  与方阻之间的相互依赖关系比较明显,从大量统计数据可知,高方阻条件下,电池有着较高的  $V_{oc}$ ,这与前面得到的实验结果相似。

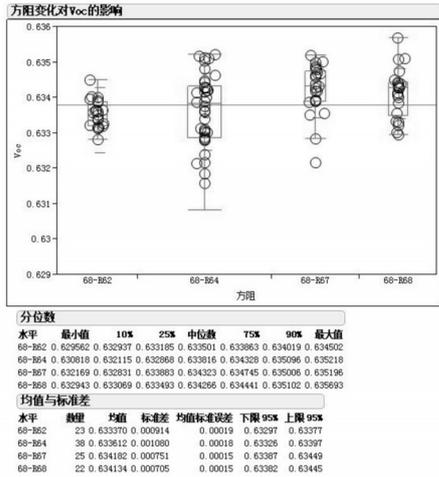


图8 68栅线条件下方阻变化对  $V_{oc}$  的影响

图9是相同发射结正电极栅线68根的条件下,相同方阻条件下,最后得到的电池的串联电阻  $R_s$ 。从图中可以看出,在相同栅线的情况下,随着发射结方块电阻的增加,最终电池的  $R_s$  均值约保持在5.5 m $\Omega$ ,只有方阻64  $\Omega/\square$ 下得到了约6.25 m $\Omega$ 的串联电阻。

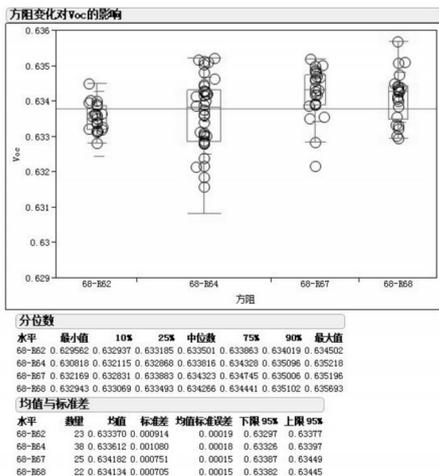


图9 方阻变化对电池串联电阻的影响

图10是相同正电极栅线条件下,不同方块电阻对电池  $FF$  的影响。从图中可以看出,发射方块电阻

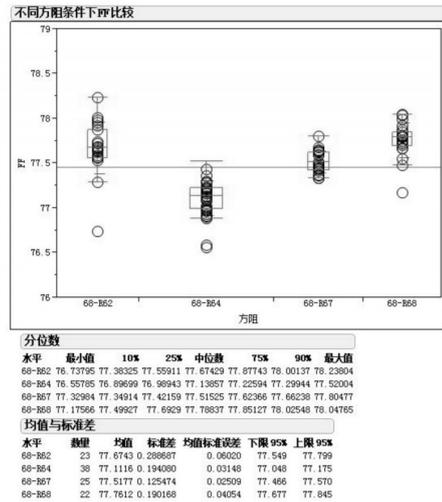


图10 方阻变化对电池  $FF$  的影响

的小幅变化,对电池最终填充因子  $FF$  没有显著的影响,总体上相对来说,方阻62  $\Omega/\square$ 条件下能获得较优的  $FF$  因子,多数能上升到78%以上。

与上述测试结果中类似,图11是在不同发射结方阻条件下,得到的电池的最终效率图,除了方阻64  $\Omega/\square$ 的电池效率明显偏低外,其他方阻条件下,获得的电池效率没有明显差异。

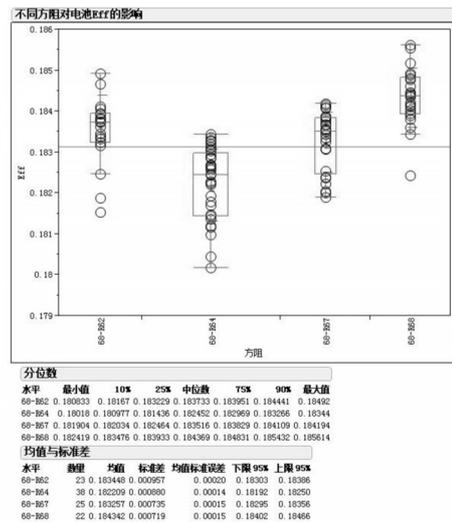
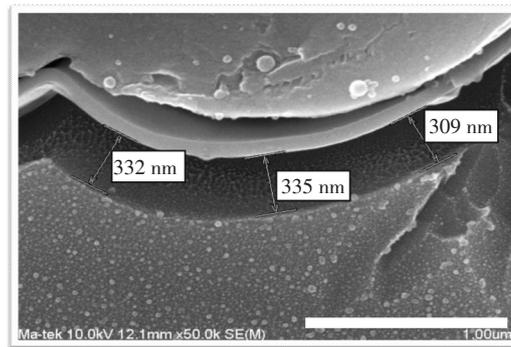


图11 方阻变化对电池效率( $\eta_{FF}$ )的影响

图12是对试验中的晶体硅电池的PN结的SEM图。经过对大量高方阻发射结结深进行测试,并与常规电池的PN结结深相比,从测试结果中可以看出,常规工艺中PN结结深约在0.384  $\mu\text{m}$ ,获得的方块电阻为64  $\Omega/\square$ 时的电池PN结结深为0.339  $\mu\text{m}$ 。虽然为深结高方阻,但是还是比常规方阻电池结深浅。



常规方阻结深

高阻结深

结深	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值/(nm)
常规方阻	360	371	370	359	448	457	353	358	393	371	384
高阻	307	257	361	409	363	309	335	332	324	393	339

图12 晶体硅电池PN结SEM

2.3 68栅线下高方阻电池印刷烧结工艺优化

电极浆料的选择至关重要,文中在不同方阻条件下,以及不同浆料条件下的电池性能进行了全面分析,结果 duPont 公司的 17 A 浆料,不管是在哪种发射结

由于高方阻发射结电池量产过程中,发射结正

表2 烧结曲线优化及测试结果

	220	240	250	310	470	510	585	610	705	950	
Type	$P_{mpp}$	$U_{mpp}$	$I_{mpp}$	$V_{oc}$	$I_{sc}$	$R_s$	$R_{sh}$	FF	$N_{cell}$	$I_{rev1}$	
1	2.853	0.526	5.422	0.632	5.776	0.005	15.057	78.209	0.184 3	0.524	
2	2.874	0.528	5.442	0.633	5.793	0.005	17.666	78.333	0.185 7	0.427	
3	2.861	0.527	5.431	0.632	5.790	0.005	23.934	78.134	0.184 8	0.341	
4	2.834	0.523	5.414	0.632	5.785	0.006	12.515	77.506	0.183 0	0.586	
5	2.866	0.527	5.443	0.634	5.811	0.006	16.375	77.735	0.185 1	0.462	
6	2.876	0.528	5.446	0.635	5.810	0.005	15.665	78.007	0.185 8	0.487	
7	2.859	0.526	5.431	0.634	5.802	0.005	19.142	77.770	0.184 6	0.423	
8	2.876	0.528	5.444	0.634	5.806	0.005	13.146	78.152	0.185 7	0.561	
9	2.874	0.528	5.444	0.633	5.800	0.005	25.074	78.280	0.185 6	0.444	
10	2.891	0.530	5.457	0.635	5.818	0.005	14.959	78.253	0.186 7	0.494	
11	2.874	0.528	5.443	0.634	5.799	0.005	24.614	78.204	0.185 6	0.442	

方阻条件下,与其他公司的正电极浆料相比,始终能得到较优的电池性能,电池在效率提升方面有着比较明显的优势。

为了更进一步优化正面68栅线,高方阻电池的烧结性能,对后道烧结工艺进行了大量实验,主要是对影响浆料与发射结接触的高温段进行了大量实验优化工作。具体试验参数结果详见表2。从表2中可以看出,10号优化烧结工艺获得了这一系列中最高的电池开路电压 $V_{oc}$ 以及较优的电池串联电阻、较优的电池填充因子 $FF$ ,最终获得了18.67%电池效率。

### 3 结论

分析了扩散发射结方阻对电池性能的影响;68栅线下各项电池性能参数的优化;在现有进口Baccini丝网印刷线及Despatch烧结炉基础上,开发适用于高方阻的丝网印刷工艺,即较优的高方阻电池烧结工艺。

通过大量优化实验,获得了高达635 mV的开路电压,短路电流 $I_{sc}$ 为5.817 A,均值18.67%的电池效率。基本达到本实验的最初设计结果。

### 参考文献

- [1] 杨德仁, 太阳能电池材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 滨川圭弘, 太阳能光伏电池及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] 马丁·格林, 太阳能电池工作原理、工艺和系统的应用[M].

北京: 电子工业出版社, 1987.

- [4] 安其霖, 曹国深. 太阳能电池原理与工艺[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 47-48.
- [5] P P Altermatt, A Schenk, F Geelhaar. Reassessment of the intrinsic carrier density in crystalline silicon in view of band-gap narrowing[J]. Appl. Phys. Lett, 2003, 93: 1598.
- [6] M A Green. Solar Cells Operating Principles. Technology and System Applications[M]. N J Inc. Englewood Cliffs. 1982.
- [7] J L Boone, T P Van Doren. Solar-cell design based on a distributed diode analysis[J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 1978, 25(7): 767-771.
- [8] 杨乐, 高华. 太阳能电池栅线优化设计[J]. 光电技术应用, 2012, 27(1): 41-44.
- [9] G A Armin. Overview on SiN surface passivation of crystalline silicon solar cells [J]. Solar Energy materials and solar cells, 2001, 65: 239-248.
- [10] T Lauinger, B Lenkeit, A G Aberle. Comparison of remote versus direct PECVD Silicon Nitride Passivation of Phosphorus diffused emitters of silicon solar cells[C]// 2nd WCPVSEC Vienna Austria, 1998: 1434.
- [11] M Spiregel, C Zechner, B Bitnar, etc. Ribbon growth on substrate silicon solar cells with MW induced remote hydrogen plasma passivation and efficiencies exceeding 11% [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1998, 55: 331-340.
- [12] J Dziewior, W Schmid. Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon[J]. Applied Physics Letters, 1977, 31: 346 - 348.

### 欢迎利用期刊网站浏览本刊已发表文章

为了满足读者对《光电技术应用》期刊文章的快速、方便、阅读需求,《光电技术应用》期刊网站(网址为: <http://www.gdjsyy.com>),为读者提供了《光电技术应用》期刊2009~2012年已发表文章的在线浏览。读者可在过刊目录下,查阅2009~2012年期刊各期目录,点击文章题目或摘要,阅读文章全文。欢迎广大读者登陆期刊网站,及时了解《光电技术应用》期刊已发表文章的最新信息。

《光电技术应用》编辑部