

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.03.005

背面钝化晶体太阳能电池铝浆局部背电场性能研究

周浩^{1,2}, 曾凯², 孟文静¹, 刘建龙¹

(1. 湖南工业大学 城市与环境学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南利德电子浆料股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要: 首先制备了4款不同玻璃粉添加量的背钝化铝浆样品, 并在工业链式快速烧结炉上与背银和正银共烧得到背面钝化晶硅太阳能(PERC)电池片, 然后采用扫描电子显微镜(SEM)、电阻测试仪以及电池片效率分选机对电池片样品进行表征, 探讨了玻璃粉添加质量分数、烧结温度以及印刷单耗对局部铝掺杂背电场(L-BSF)厚度和效率的影响。结果表明: 随着玻璃粉添加质量分数增加或烧结温度升高, L-BSF层厚度增大, 转换效率和开路电压均先增大后降低, 当玻璃粉添加质量分数为1.2%时样品的转换效率最高, 达21.6%; 当烧结峰值温度为780℃时, 样品的转换效率最高, 达21.4%; 随着印刷单耗增大, 转换效率先增加后降低, 开路电压降低, L-BSF层厚度基本不变, 当印刷单耗为0.18 g时, 样品的转换效率最高, 达21.6%。

关键词: 铝浆; 晶硅太阳能电池; 局部背电场; 转换效率; 开路电压

中图分类号: TM914.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)03-0027-07

引文格式: 周浩, 曾凯, 孟文静, 等. 背面钝化晶体太阳能电池铝浆局部背电场性能研究[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(3): 27-33.

Study on the Local Back Electric Surface Field Performance of Aluminum Pastes in Back Passivated Crystal Solar Cells

ZHOU Hao^{1,2}, ZENG Kai², MENG Wenjing¹, LIU Jianlong¹

(1. College of Urban and Environmental Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Hunan LEED Electronic Ink Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: With four kinds of back passivation aluminum paste samples prepared with different glass powder additions, back passivated crystalline silicon solar cells (PERC) can be obtained by co-firing with the back silver and the positive silver in the chain type rapid sintering furnace of the industrial production line. The scanning electron microscope (SEM), resistance tester and cell efficiency sorter are used to characterize the cell sample, followed by an inquiry into the effects of glass powder addition mass fraction, sintering temperature and printing unit consumption on the thickness and efficiency of local aluminum-doped back surface field (L-BSF). The results show that with the increase of glass powder content or sintering temperature, the thickness of L-BSF layer increases, while the conversion efficiency and open-circuit voltage shows a trend of an initial increase and a subsequent decrease. When the glass powder content is 1.2%, the sample is characterized with the highest conversion efficiency, reaching as high as 21.6%. When the sintering peak temperature is maintained at 780℃, the conversion efficiency of the sample is the highest, up

收稿日期: 2022-08-23

基金项目: 湖南省省市联合基金资助项目(2022JJ50069)

作者简介: 周浩(1989-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为农村区域发展与政策,

E-mail: 42296450@qq.com

通信作者: 刘建龙(1974-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为绿色建筑与建筑节能技术,

E-mail: ljlpd@sina.com

to 21.4%; with the increase of printing unit consumption, the conversion efficiency first increases and then decreases; meanwhile, the open-circuit voltage decreases, while the thickness of L-BSF layer remains basically unchanged. When the printing unit consumption is 0.18 g, the conversion efficiency of the sample reaches up to 21.6%, the maxim of its conversion efficiency.

Keywords: aluminum paste; crystalline silicon solar cells; local BSF; conversion efficiency; open-circuit voltage

1 研究背景

光伏技术是一种主要的绿色新能源技术, 为了进一步普及其应用, 降低光伏发电站的度电成本, 提高光伏电站的经济效益, 研究低成本高效率的太阳能电池 (大于 20%) 成为其发展趋势^[1-2]。钝化发射极和背面接触电池 (passivated emitter and rear contact, PERC)^[3-4], 因其高质量的背表面钝化作用, 可显著提高电池的开路电压和短路电流, 在单晶硅片生产上, 其转换效率提升约 1%; 在多晶硅片上, 其最高转换效率提升约 0.6%。由于 PERC 技术在晶硅电池转换效率方面上表现出了更好的溢价优势和发展空间, 因而各大电池厂商都在积极开展 PERC 技术的推广和应用^[5-8]。

由于 PERC 电池结构的特殊性, 采用传统铝浆会破坏氮化硅和氧化铝表面的钝化层质量, 其玻璃粉高温融化时易诱导针孔漏电, 腐蚀氮化硅, 导致局部背电场 (local back surface field, L-BSF) 厚度过薄或缺失^[9]。此外, 传统铝浆在 PERC 电池激光开模处经高温烧结后容易出现孔洞, 即铝硅合金层缺失, 导致串阻增大, 转换效率降低^[10]。因此, 研究专用背钝化铝浆在局部接触处铝掺杂背电场形成的质量, 成为提升 PERC 电池效率的关键。在 PERC 电池局部铝硅接触的工艺研究和优化上, 主要集中在钝化保护层激光开模的几何形状, 如点接触图案、线接触图案、接触间距以及开口宽度等, 对孔洞产生率和背电场厚度的影响^[11-13]。E. Urrejola 等^[14]基于高温烧结下铝和硅原子相互扩散速率不同, 提出了柯肯达尔效应, 成功解释了背钝化铝浆中引入硅粉^[15]能增大铝硅合金中熔体硅饱和浓度, 调节背钝化铝浆配方中铝和硅原子的扩散速率^[16-17]后, 能够抑制孔洞产生。K. Dressler 等^[18]研究发现, 孔洞的产生依赖于烧结温度曲线, 而属于经典固相扩散反应的柯肯达尔效应无法合理解释得到的实验数据。R. Horbelt 等^[19]就背钝化铝浆在高温快烧下铝粉烧结密度的变化, 提出了体积效应, 对铝浆高温烧结下容易产生孔洞同样做

出了合理解释。上述研究多针对孔洞产生的原因提出了各种理论解释和模型, 但是缺乏对光伏产业使用背钝化铝浆工艺理论上的指导, 以及玻璃粉对背钝化铝局部背电场性能研究方面的报道。

本文拟研究制备工艺参数对铝背场的影响和电场性能的影响。太阳能电池铝背场的作用是为了减少少数载流子在后表面复合, 主要与电场大小有关。因此, 研究了背钝化铝浆中玻璃粉添加量、烧结峰值温度和单耗对局部背电场厚度和 PERC 电池转换效率的影响规律, 以期对光伏产业制备高性能 PERC 电池提供理论参考。

2 实验

2.1 样品制备

背钝化铝浆是由铝粉、玻璃粉、有机载体以及添加剂共同配制而成。铝粉主要起导电和局部铝背场掺杂作用。玻璃粉用作烧结黏结相, 与铝粉共同形成导电致密膜层。调节玻璃粉配方体系和含量, 可以有效地调控铝硅扩散速率、致密铝膜层的膨胀系数和附着力。有机载体能够保证浆料的正常丝网印刷需要和浆料的储存稳定性。添加剂包含润湿分散剂、流平剂、消泡剂、流变助剂、防沉降剂以及稀释剂等。选取定制的铝粉和玻璃粉, 按照一定比例添加有机载体和添加剂, 表 1 给出了设定的 4 种背钝化铝浆样品中各组分的添加质量分数。按比例称取各组分后, 经搅拌、分散和三辊研磨轧制成背钝化铝浆样品。

表 1 背钝化铝浆样品中各组分的添加质量分数

Table 1 Chemical composition in back passivation aluminum paste samples %

背钝化铝浆样品	铝粉	玻璃粉	添加剂	有机载体
PERC-01	X	0	0.8	99.2-X
PERC-02	X	0.6	0.8	98.6-X
PERC-03	X	1.2	0.8	98.0-X
PERC-04	X	1.8	0.8	97.4-X

2.2 电池片制备

选取厚为 200 μm 、尺寸为 156 mm $\times$ 156 mm、电阻率为 1~3 $\Omega\cdot\text{cm}$ 的 P 型单晶 PERC 半成品硅片,

并利用激光将其切割成 $70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 的小片,用于实验测试和表征。将制备好的背钝化铝浆样品通过丝网印刷在 PERC 半成品硅片背面,与背银和正银共烧后制备成单晶 PERC 电池片。

2.3 表征

采用电阻测试仪 (SB2230 型直流数字电阻测试仪) 测试背钝化铝浆样品烧结后膜层的电阻率;采用效率分选机 (博硕 BSSA60 光伏电性能分析系统) 测试背钝化铝浆样品烧结后的转换效率;采用 Phenom 扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察背钝化铝浆样品烧结后的断面微观结构,测量局部铝掺杂背电场厚度。

3 结果与讨论

3.1 玻璃粉添加量对背钝化铝浆的影响

图 1 是不同玻璃粉添加质量分数背钝化铝浆样品的局部背电场截面 SEM 图。

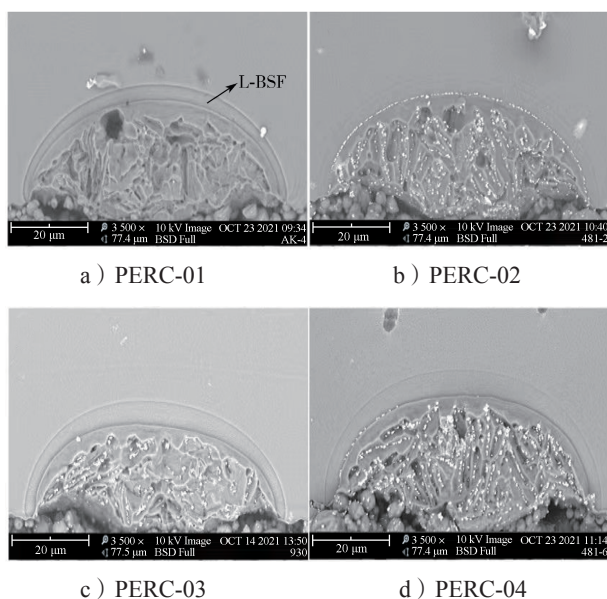


图 1 背钝化铝浆样品局部背电场截面 SEM 图

Fig. 1 Cross-section SEM images of local Al back surface field

由图 1 可以看出, 4 个样品都出现了明显的局部铝掺杂背电场层 (L-BSF), 并且铝硅合金层与钝化层接触的两个开口边缘处 L-BSF 层比较薄, 铝硅合金层与硅结合的中心处 L-BSF 比较厚。如图 1 所示, 没有添加玻璃粉的背钝化铝浆样品 PERC-01 的中心处 L-BSF 层厚度为 $3.09\text{ }\mu\text{m}$, 边缘 L-BSF 层厚度为 $2.04\text{ }\mu\text{m}$ (图 1a); 玻璃粉添加质量分数为 0.6% 的样品 PERC-02 的中心处 L-BSF 层厚度为 $3.54\text{ }\mu\text{m}$ (图 1b); 玻璃粉添加质量分数为 1.2% 的样品 PERC-03 的中心处 L-BSF 层厚度为 $4.35\text{ }\mu\text{m}$ (图 1c); 添加质

量分数为 1.6% 的样品 PERC-04 的中心处 L-BSF 层厚度为 $4.82\text{ }\mu\text{m}$ (图 1d)。

在高温快速烧结下, 玻璃粉融化润湿铝粉, 能够显著降低铝粉的熔化温度, 促进铝硅互扩散速率。玻璃粉添加质量分数越高, 铝粉融化程度越大, 高温下产生的液相铝从钝化层开口处的硅片中溶解的硅越多。在冷却过程中, 液态铝硅合金会凝固析出, 形成铝硅合金层, 在硅界面中心处形成铝掺杂, 进入硅晶格中厚的 L-BSF 层^[9]; 而在与钝化层接触的两个边缘处, 高温下液相铝由于受钝化层阻隔, 所接触以及溶解的硅含量有限, 因此形成比较薄的 L-BSF 层, 所以随着玻璃粉添加质量分数的增加, L-BSF 层的中心厚度从 $3.09\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $4.82\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 2 为背钝化铝浆样品 L-BSF 层平均厚度统计值随玻璃粉添加质量分数变化曲线。由图可知, 随着铝浆中玻璃粉添加质量分数的增加, L-BSF 层厚度呈线性增大的变化趋势。

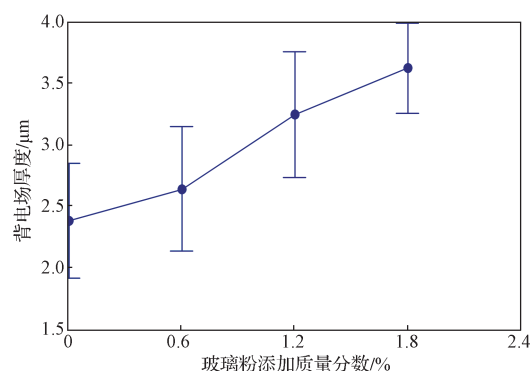


图 2 样品的背电场平均厚度随玻璃粉添加质量分数的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of the average thickness of L-BSF changing with the added massfraction of the glass powder

图 3 为背钝化铝浆样品烧结后铝层电阻率随玻璃粉添加质量分数的变化曲线。

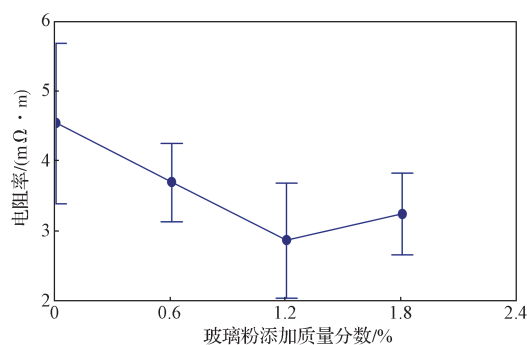


图 3 样品烧结后铝层电阻率与玻璃粉添加质量分数的关系曲线

Fig. 3 Relation curves between resistivity of aluminum layers and the added massfraction of the glass powder after sintering

如图 3 所示,背钝化铝浆样品烧结后的铝膜层电阻率先随着玻璃粉添加质量分数的增加而降低,当玻璃粉添加质量分数超过 1.2% 后,玻璃粉添加量越大,铝膜层的电阻率越高。玻璃粉在促进铝粉熔化成液态和铝颗粒层烧结致密化的同时,也会加剧铝粉的氧化,因此随着玻璃粉添加量增加,铝颗粒层在液态玻璃相的作用下收缩并致密化,电阻率降低。当玻璃粉添加质量分数超过 1.2% 后,铝粉氧化严重,部分铝颗粒表面形成了大量的氧化铝膜,而氧化铝陶瓷相在铝层中会增大其电阻。

图 4 是不同玻璃粉添加质量分数背钝化铝浆样品的电性能参数变化曲线。

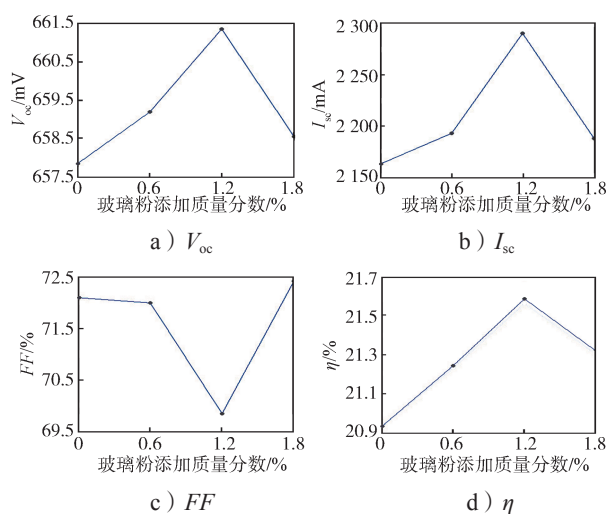


图 4 背钝化铝浆样品电性能参数随玻璃粉添加量变化曲线

Fig. 4 Variation curves of electrical performance parameters of aluminum paste samples changing with glass powder addition

从图 4 所示样品的电性能参数随玻璃粉添加量变化曲线可以看出,当玻璃粉的添加质量分数为 1.2% 时,所制备的 PERC-03 铝浆样品的转换效率最高,达 21.60%,而未添加玻璃粉的 PERC-01 铝浆样品的转换效率最低。随着玻璃粉添加量增加,背钝化铝浆的开路电压 V_{oc} 和短路电流 I_{sc} 呈先增大后减小的变化趋势,而填充因子 FF 先减小后增大,均在添加质量分数为 1.2% 时达极值;当玻璃粉添加质量分数为 1.8% 时,背钝化铝浆的 V_{oc} 和 I_{sc} 均显著降低、 FF 增大,这一结果说明,此时的玻璃粉已经对 Al_2O_3/SiO_2 钝化层产生损伤,导致背面钝化质量减弱,降低了电池片的转换效率。由图 2 可以得知,随着玻璃粉添加量的增加,LBSF 层厚度依次增大,越厚的 LBSF 层的场钝化作用越强、导电性能越好,促使电池片的 V_{oc} 和 I_{sc} 增大,与图 4 所示测得的电性能参数变化一致。由于钝化层接触的载流子复合速率为 79 cm/s,远小

于载流子复合速率为 600 cm/s 的铝背电场金属化接触^[6],因此当玻璃粉添加质量分数增加到 1.8% 后,玻璃粉损伤钝化层减弱的钝化作用远大于 LBSF 层厚度增加所起到的场钝化作用。

3.2 烧结温度对背钝化铝浆的影响

为了进一步了解背钝化铝浆对 PERC 电池片转换效率的影响,选用背钝化铝浆样品 PERC-03,探讨在不同烧结峰值温度和单耗下的局部背电场性能和 PERC 电池片转换效率的关系。

图 5 是不同烧结峰值温度下背钝化铝浆样品 PERC-03 的局部背电场 SEM 图。

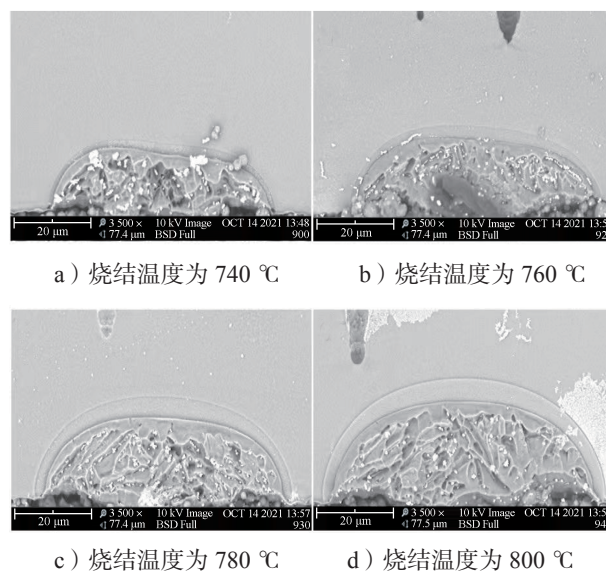


图 5 背钝化铝浆样品 PERC-03 局部背电场 SEM 图

Fig. 5 Cross-section SEM images of local Al back surface field of sample PERC-03

由图 5 所示各样品局部背电场 SEM 图可以看出,4 个不同峰值温度下 PERC-03 样品 LBSF 层的厚度差异较大。在 740 °C 烧结温度下,PERC-03 样品中心处 LBSF 层厚度为 2.37 μm (图 5a);在 760 °C 烧结温度下,PERC-03 样品中心处 LBSF 层厚度为 3.04 μm (图 5b);在 780 °C 烧结温度下,PERC-03 样品中心处 LBSF 层厚度为 4.23 μm (图 5c);在 800 °C 烧结温度下,PERC-03 样品中心处 LBSF 层厚度为 4.91 μm (图 5d)。

随着烧结峰值温度升高,铝熔化程度增大,硅在铝中的溶解度增大,液相铝从硅片中溶解的硅的含量越大,依据铝硅相图杠杆原理,在冷却凝固和析出外延生长铝掺杂硅相越多,导致 LBSF 层的厚度从 2.37 μm 增大到 4.91 μm 。

图 6 为 PERC-03 样品 LBSF 层的平均厚度统计值与烧结峰值温度的关系曲线。

由图 6 可知,随着烧结温度升高,LBSF 层厚度

几乎呈线性增大的变化趋势。

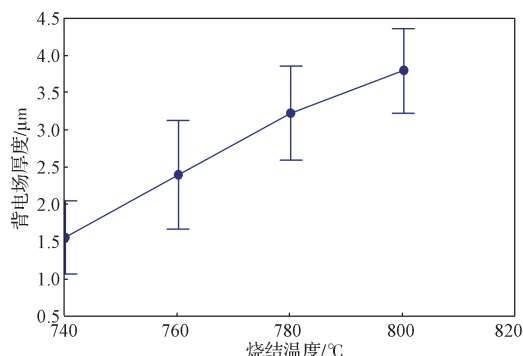


图6 样品 PERC-03 背电场平均厚度随烧结温度变化曲线

Fig. 6 Diagram curves of the average thickness of back electric field of sample PERC-03 changing with sintering temperature

图7是不同烧结温度下背钝化铝浆样品 PERC-03 的电性能参数变化图。

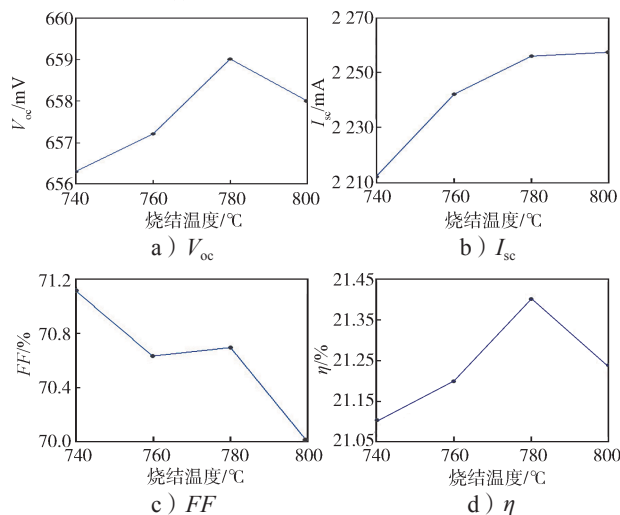


图7 样品 PERC-03 电性能参数随烧结温度变化曲线

Fig. 7 Variation curves of electrical performance parameters of sample PERC-03 changing with sintering temperature

从图7所示样品电性能参数随烧结温度变化曲线中可以看出,当烧结温度为780℃时,PERC-03样品的转换效率最高,约达21.40%;而烧结温度为800℃时,PERC-03样品的转换效率为21.24%;烧结温度为760℃时,PERC-03样品的转换效率为21.19%;在最低烧结温度740℃下,PERC-03样品的转换效率只有约21.1%。随着烧结峰值温度升高,L-BSF层厚度增大,局部铝背电场金属化接触的场钝化效果提升,PERC-03样品的 V_{oc} 和 I_{sc} 增大,转出效率逐渐增大。当烧结温度升高到800℃后,PERC-03样品的转换效率和 V_{oc} 均降低。此时,过高的烧结温度引起的 Al_2O_3/SiO_2 钝化层损伤减弱背面钝化质量程度,要比L-BSF层厚度增大促使铝背电场金属化接触的场钝化效果提升作用大,从而导致样品的转换

效率和 V_{oc} 降低。

3.3 单耗对背钝化铝浆的影响

图8所示为实验所得不同印刷单耗的背钝化铝浆样品 PERC-03,在780℃的烧结温度下的局部背电场 SEM图。

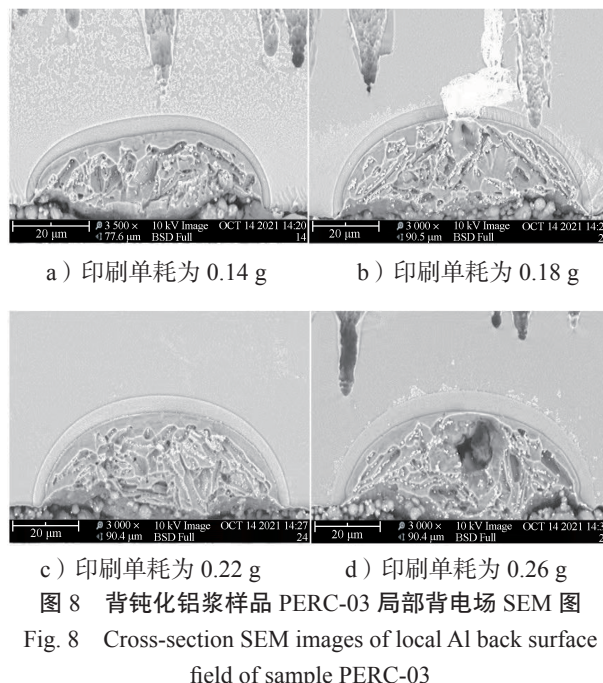


图8 背钝化铝浆样品 PERC-03 局部背电场 SEM图

Fig. 8 Cross-section SEM images of local Al back surface field of sample PERC-03

由图8可以看出,4个不同印刷单耗对应下的PERC-03样品的L-BSF层厚度差异不够明显。当印刷单耗为0.14 g时,PERC-03样品中心处的L-BSF层厚度为3.75 μm(图8a);当印刷单耗为0.18 g时,PERC-03样品中心处的L-BSF层厚度为3.91 μm(图8b);当印刷单耗为0.22 g时,PERC-03样品中心处的L-BSF层厚度为4.23 μm(图8c);当印刷单耗为0.26 g时,PERC-03样品中心处的L-BSF层厚度为5.10 μm(图8d)。

不同印刷单耗下获得L-BSF层厚度不同,是因为随着背钝化铝浆样品 PERC-03 印刷单耗的提高,在同等烧结温度下,印刷铝浆单耗越大,形成的铝层越厚,产生的液相铝越多,铝硅互溶扩散形成的液相铝硅合金越多,在冷却时凝固和析出外延生长铝掺杂硅相越多,形成的L-BSF层越厚。

图9为PERC-03样品L-BSF层平均厚度统计值与印刷单耗的关系曲线。

由图9可知,L-BSF层平均厚度随印刷单耗的增加缓慢增大,但是当单耗增加到0.22 g后,L-BSF层厚度显著增大,并且整个L-BSF层在钝化层开口两个边缘处的厚度与中心处的厚度差异更小,说明提高背钝化铝浆的印刷单耗可以改善L-BSF层的均匀性,提高浆料烧结窗口。

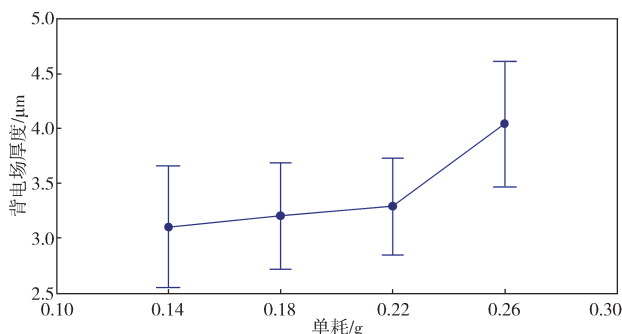


图9 样品 PERC-03 背电场平均厚度随印刷单耗变化曲线

Fig. 9 Variation curves of the average thickness of back electric field of sample PERC-03 changing with printing unit consumption

图 10 是印刷不同单耗背钝化铝浆样品 PERC-03 在 780 °C 烧结温度下的电性能参数曲线。

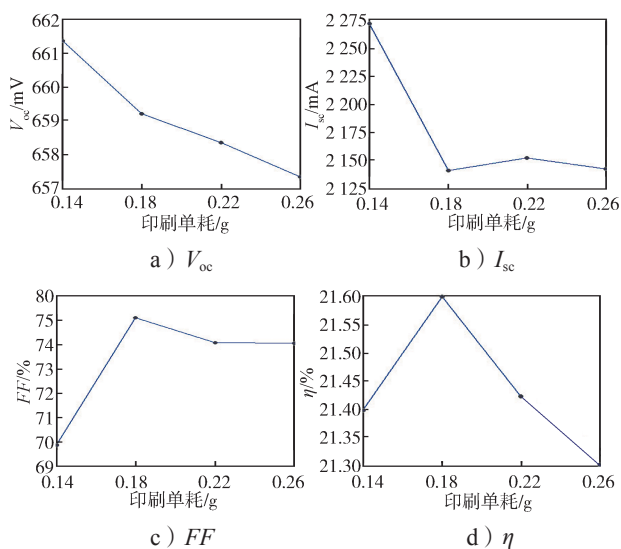


图 10 样品 PERC-03 电性能参数随印刷单耗变化曲线

Fig. 10 Changing curves of electrical performance parameters of sample PERC-03 with printing unit consumption

从图 10 所示样品电性能参数随印刷单耗变化曲线中可以看出, 当印刷单耗为 0.18 g 时 PERC-03 样品的平均转换效率最高, 达 21.60%; 而印刷单耗为 0.14 g 和 0.22 g 时 PERC-03 样品的平均转换效率均约为 21.40%; 在最高印刷单耗为 0.26 g 时, PERC-03 样品的平均转换效率只有 21.30%。这是因为随着印刷单耗的增加, 活性液态铝熔体越多, 对钝化层的溶解和腐蚀性越强, 导致 V_{oc} 和 I_{sc} 逐渐降低, 因此转换效率和填充因子先增大后降低, 说明背钝化铝浆印刷单耗对 PERC 电池片转换效率影响较为明显。至于液态铝原子对钝化层组份和钝化作用的损伤机理, 有待下一步深入研究。

图 11 是背钝化铝浆样品 PERC-03 在光伏晶硅太阳能电池片厂家线上使用的一张转换效率为 22.5% 的工业化 PERC 电池片的 $I-V$ 测试特性曲线。由图可

知, 电池片的开路电压 V_{oc} 达 0.67 mV, 填充因子 FF 达 83.02%, 表明 PERC-03 背钝化铝浆样品完全达到了先进水平。

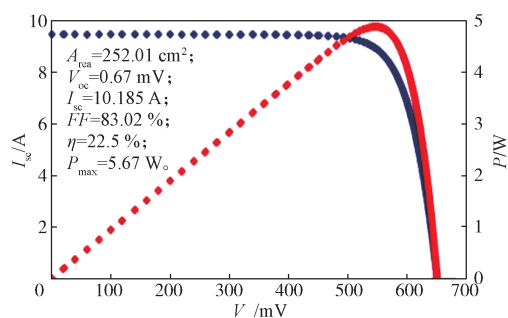


图 11 工业化 PERC 电池片的 $I-V$ 测试特性曲线

Fig. 11 $I-V$ test characteristic curves of industrialized PERC cells

4 结论

选用特定化学成分玻璃粉配方制备了 4 款背钝化铝浆样品, 并利用工业链式快速烧结炉对印刷背钝化铝浆的 PERC 电池片进行烧结。利用 SEM、电阻测试仪及电池片效率分选机对电池片样品进行了表征, 研究发现:

1) 背面钝化晶硅太阳能电池背钝化铝浆局部背电场性能与铝浆中玻璃粉添加量、烧结温度以及印刷单耗密切相关, 选择合适组份和工艺参数是改善背钝化铝浆转换效率的关键。

2) 当玻璃粉添加质量分数为 1.2% 时, 所制备的 PERC-03 铝浆的转换效率最高, 达 21.6%, 中心处 L-BSF 层厚度为 4.35 μm 。随着玻璃粉添加量增加, L-BSF 层厚度增大, 转换效率和开路电压均先增大后降低。

3) 当烧结峰值温度为 780 °C 时, PERC-03 样品的转换效率最高, 达 21.4%, 中心处 L-BSF 层厚度为 4.23 μm 。随着烧结温度升高, L-BSF 层厚度增大, 转换效率和开路电压均先增大后降低。

4) 当印刷单耗为 0.18 g 时, PERC-03 样品的转换效率最高, 达 21.6%, 中心处 L-BSF 层厚度为 3.55 μm 。随着印刷单耗增大, 转换效率先增加后降低, 开路电压降低, L-BSF 层厚度基本不变, 当印刷单耗超过一定范围后, L-BSF 层厚度急剧增大。

参考文献:

- [1] AXEL M, DENNIS A, STEFAN B, et al. Industrial High Performance Crystalline Silicon Solar Cells and Modules Based on Rear Surface Passivation

- Technology[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 120: 417–425.
- [2] CHEN R, TONG H B, ZHU H T, et al. 23.83% Efficient Mono-PERC Incorporating Advanced Hydrogenation[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2020, 28(12): 1239–1247.
- [3] 尹 光. PERC 太阳能电池铝背场性能测试及分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
YIN Guan. Test and Analysis on the Performances of Aluminum Back Surface Field of PERC Solar Cells[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [4] 刘 雷. PERC 太阳能电池铝背场性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
LIU Lei. Study on the Performances of Aluminum Back Surface Field of PERC Solar Cells[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [5] WANG Z J, HAN P Y, LU H Y, et al. Advanced PERC and PERL Production Cells with 20.3% Record Efficiency for Standard Commercial P-Type Silicon Wafers[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2012, 20: 260–268.
- [6] CHEN Y F, SHEN H, ALTERMATT P P. Analysis of Recombination Losses in Screen-Printed Aluminum-Alloyed Back Surface Fields of Silicon Solar Cells by Numerical Device Simulation[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 120: 356–362.
- [7] RENATE H, GABRIEL M, PHILIPP K, et al. Surface Recombination Velocity of Local Al-Contacts of PERC Solar Cells Determined from LBIC Measurements and 2D Simulation[J]. *Energy Procedia*, 2016, 92: 82–87.
- [8] HELGE H, THORSTEN D, ULRIKE B, et al. 21.2%-Efficient Fineline-Printed PERC Solar Cell with 5 Busbar Front Grid[J]. *Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Letters*, 2014, 8(8): 675–679.
- [9] 王丽婷, 黄国平, 黄惜惜, 等. 高效 PERC 单晶硅太阳能电池局部背表面场的工艺研究 [J]. *太阳能*, 2020(7): 82–88.
WANG Liting, HUANG Guoping, HUANG Xixi, et al. Study on the Process of Local Rear Surface Field of High-Efficiency PERC Monocrystalline Silicon Solar Cell[J]. *Solar Energy*, 2020(7): 82–88.
- [10] RAUER M, SCHMIGA C, WOEHL R, et al. Investigation of Aluminum-Alloyed Local Contacts for Rear Surface-Passivated Silicon Solar Cells[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2011, 1(1): 22–28.
- [11] URREJOLA E, PETER K, PLAGWITZ H, et al. Understanding and Avoiding the Formation of Voids for Rear Passivated Silicon Solar Cells[C]// Presentation at the 3rd Metallization Workshop. Charleroi: s.n., 2011: 15–18.
- [12] DRESSLER K, DAUWE S, DROSTE T, et al. Characterisation of Rear Local Contacts Including BSF Formation Using Raman and Scanning Acoustic Microscopy[C]//European Photovoltaic Solar Energy Conference & Exhibition. Frankfurt: s.n., 2012: 755–758.
- [13] CHEN Y F, ALTERMATT P P, DONG J W, et al. Al-Alloyed Local Contacts for Industrial PERC Cells by Local Printing[C]//2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). Denver, CO, USA: IEEE, 2014: 3322–3325.
- [14] URREJOLA E, PETER K, PLAGWITZ H, et al. Silicon Diffusion in Aluminum for Rear Passivated Solar Cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(15): 153508–153512.
- [15] 徐剑锋. 玻璃粉对太阳能电池铝浆的性能研究 [J]. *山东化工*, 2021, 50(8): 32–35.
XU Jianfeng. Study on the Properties of Glass Powder to Aluminum Paste of Solar Cell[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2021, 50(8): 32–35.
- [16] 丁冰冰, 谢 欣. 铝粉活性对双面 PERC 太阳电池铝浆性能的影响 [J]. *太阳能*, 2022(3): 22–28.
DING Bingbing, XIE Xin. Effect of Al Powder Activity on the Properties of Al Paste for Bifacial PERC Solar Cells[J]. *Solar Energy*, 2022(3): 22–28.
- [17] CHEN D M, DENG W W, SHENG J, et al. Preventing the Formation of Voids in the Rear Local Contact Areas for Industrial-Type PERC Solar Cells[C]//28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Paris: s.n., 2013: 770–775.
- [18] DRESSLER K, KRATT M, VOSS P A, et al. Influence of Al Particle Size and Firing Profile on Void Formation in Rear Local Contacts of Silicon Solar Cells[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2016, 6(1): 68–73.
- [19] HORBELT R, HERGUTH A, HAHN G, et al. Temperature Dependence of Void Formation in PERC Cells and Their Spatially Resolved Detection by Combining Scanning Acoustic Microscopy and Electroluminescence Measurements[C]//29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Amsterdam: s. n., 2014: 427–432.

(责任编辑: 廖友媛)