

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.05.002

# 硼添加剂对背钝化太阳能电池的性能影响及机理研究

刘长海<sup>1</sup>, 张进<sup>1</sup>, 陈智栋<sup>2</sup>, VITYUK Sergey<sup>3</sup>

(1. 常州大学 材料科学与工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学 石油化工学院, 江苏 常州 213164;  
3. 摩诺克里斯光伏科技(常州)有限公司, 江苏 常州 213164)

**摘要:**以 3 种含硼化合物作为添加剂, 对背钝化(PERC)太阳能电池铝浆进行了系统地性能研究。其中,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  的添加质量分数为 1.0% 时, 填充因子最大可达到 78.5%, 太阳能电池光电转换效率可达到 20.2%。通过 SEM 和 EDS 对 PERC 电池片的横截面进行微观形貌表征和元素分析, 发现硼添加剂对于 PERC 电池的局部背表面层(LBSF)的厚度产生一定的影响, 从而会进一步影响背钝化太阳能电池的电性能; 另外, EDS 结果表明靠近 LBSF 层及界面铝浆中的硅含量都有增加。因此可以推断, 局部背表面层厚度的增加与硼添加剂可以增加铝硅在烧结时的互扩散有关。

**关键词:**背钝化太阳能电池; 硼添加剂; 背表面层

**中图分类号:** TM 914.41

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-0411(2018)05-0009-08

## Study on Effects and Mechanism of Boron Additive for PERC Solar Cell

LIU Changhai<sup>1</sup>, ZHANG Jin<sup>1</sup>, CHEN Zhidong<sup>2</sup>, VITYUK Sergey<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213614, China;  
2. School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 3. Mono-crystal PV Technology (Changzhou) Co., Ltd., Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Three different boron compounds were used and systematically studied as aluminum paste additives for passivated emitter rear contact (PERC) solar cells. The fill factor (FF) can increase to 78.5% and the photo-electric conversion of the PERC solar cells can reach an appreciable value of 20.2%, when 1.0% of  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  boron additive is added into aluminum paste. The micro-structures and elemental analysis of the cross-section of the PERC solar cell were carried out by SEM and EDS. The SEM results show that the boron additive can increase the inter-diffusion between aluminum and silicon atoms during sintering, and meanwhile the the thickness of local back surface field (LBSF) layer can also be controlled, which will affect the electrical properties of the solar cells. In ad-

**收稿日期:** 2018-04-15。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51702025); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20160277)。

**作者简介:** 刘长海(1986—), 男, 山东淄博人, 博士, 讲师。通信联系人: 陈智栋(1964—), E-mail: zdchen@cczu.edu.cn

**引用本文:** 刘长海, 张进, 陈智栋, 等. 硼添加剂对背钝化太阳能电池的性能影响及机理研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2018, 30(5): 9-16.

dition, the EDS results indicate that the increased thickness of LBSF layer is related to the increased inter-diffusion. And according to analysis of above results, the possible mechanism of boron-based additives in PERC solar cells was also explored.

**Key words:** PERC solar cell; boron additives; local back surface field

在工业化制备晶体硅太阳能电池中,丝网印刷制备铝层是应用最为广泛的技术。铝层不仅可以用于太阳能电池背面电接触层,而且,在丝网印刷退火过程中,铝原子会与硅原子进行相互扩散,形成 Al-Si 合金层。形成的 p-p<sup>+</sup> 结可以引入一个内部电场,叫做背表面场(back surface field, BSF),BSF 层可以阻止少数电子载流子并且阻止他们在背表面发生复合。同时,铝层还可以有助于吸收硅中的缺陷,尤其是金属杂质引入的缺陷,从而可以降低载流子复合并提升太阳能电池的性能。不同于传统太阳能电池的是,背钝化(PERC)太阳能电池技术(首先由 Blakers 提出<sup>[1]</sup>)是在太阳能电池背面进行钝化处理和激光开槽,从而有效降低表面复合速率并提高硅片内部反射率的技术<sup>[2]</sup>。因此,相比于传统硅太阳能电池,PERC 太阳能电池具有更高的转换效率。PERC 太阳能电池被认为是一种具有广阔市场前景的新型太阳能电池<sup>[3-4]</sup>。

通过合适的手段对 PERC 电池中局域背表面场(local back surface field, LBSF)层的厚度以及均匀度进行调控,如改变玻璃粉的形状、调控铝粉和玻璃粉的比例等,是进一步提升 PERC 太阳能电池的光电转换效率的有效手段<sup>[5-7]</sup>。目前对铝浆添加剂的研究主要以硼单质为硼添加剂或通过硼激光掺杂为主<sup>[8-9]</sup>,但硼单质和激光设备价格昂贵,为了降低 PERC 电池片的成本,急需寻找一种廉价的硼添加剂。文章考察了氧化硼、硼酸和硼砂等作为添加剂时,PERC 太阳能电池中 LBSF 层的厚度和均匀性,以及其对太阳能电池性能的影响,并通过系统研究对硼添加剂在铝浆退火过程中对 LBSF 层的作用机制。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂及仪器

氧化硼,硼酸,十水合四硼酸钠,氢氟酸,冰醋酸,硝酸,有机溶剂均为分析纯试剂;PERC 电池片,铝粉,玻璃粉(常州摩诺克里斯光伏科技有限公司)。

扫描电镜(JSM-6360LA,日本电子公司);HAAKE RotoVisco 1 型旋转流变仪(Thermo Scientific,美国赛默飞公司)。

### 1.2 铝浆配制及丝网印刷

分别取硼添加剂(氧化硼,硼酸,十水合四硼酸钠)0.75,1.20,1.50,2.25 g 溶于有机溶剂(由醇酯、油酸、流变助剂和乙基纤维素在 80 °C 加热混合而成),未添加硼化合物的作为参比样品。使有机溶剂和硼添加剂混合物总量保持 40 g 恒定,将混合物搅拌均匀;加入 108 g 铝粉和 2 g 玻璃粉,搅拌均匀;将混合物用三辊研磨机研磨 3 遍,可得到混合均匀的铝浆以用于丝网印刷。

印刷电池片时,先进行背面银电极印刷,后对铝浆进行印刷,最后印刷正面银电极。印刷铝浆时网版移动速度为 180~220 mm/min,印刷压力保持在 65~80 N,网版间距为 2.0~2.5 mm,保证每片硅片上铝浆的印刷质量为 0.85~0.90 g;印刷银浆时网版移动速度为 200 mm/min,印刷压力保持在 100 N,网版间距为 2 mm,保证每片硅片上的印刷质量 0.137±0.002 g。将印刷好铝浆和银浆的太阳能电池片在 300 °C 下烘干,然后在八温区带式烧结炉中烧结,峰值温度设置为 900 °C,传送带速度为 9.2 cm/s,最后获得可用于测试的 PERC 太阳能电池片。

1.3 电性能测试

电性能测试条件通过 AM 1.5 滤光片模拟自然光照条件(1 000 W/m<sup>2</sup>),测试电池片的开路电压( $U_{oc}$ )、填充因子( $F_F$ )和转换效率( $\eta$ )等电性能参数,每次测试 8 片电池片,重复测试两次;通过四探针法对太阳能电池片电阻进行测试。

1.4 微观表征

通过扫描电镜对 PERC 太阳能电池的 LBSF 层进行形貌表征,具体处理方法为:待观察试样需在混合酸溶液( $V(HF):V(HNO_3):V(CH_3COOH)=1:3:6$ )中浸泡 30 s,取出后清洗、干燥,将 LBSF 层刻蚀后方可进行观察。而对于铝浆成分分析时,直接对断面进行观察,无需进行混合酸刻蚀。

2 结果与讨论

图 1 为 PERC 太阳能电池结构示意图。PERC 电池选用的硅片正面通过酸洗刻蚀,形成抗反射层(Antireflection coating, ARC)以提高透光率,并进行磷化处理,形成  $n^+$  电极(如图 1(a))。与传统太阳能电池结构不同的是,PERC 太阳能电池在硅片背面覆盖了一层钝化层(Passivation layer,如  $Al_2O_3$ ,氮化硅等),这样的结构能够有效的降低少子复合速率。通过激光在背面开槽形成局部开口,当进行背面铝浆印刷时,铝浆通过局部开口与硅片接触(图 1(b))。烧结过后,在铝浆和硅片的结合处将形成一层局域背表面场(LBSF)。LBSF 层是由铝硅合金中的硅组分再结晶形成的<sup>[10]</sup>。LBSF 层与 PERC 太阳能电池的电性能有关,相同条件下,当 BSF 层厚度下降,会导致电性能的下降<sup>[11-13]</sup>,由此可以看出 LBSF 层对太阳能电池的性能具有重大的影响。

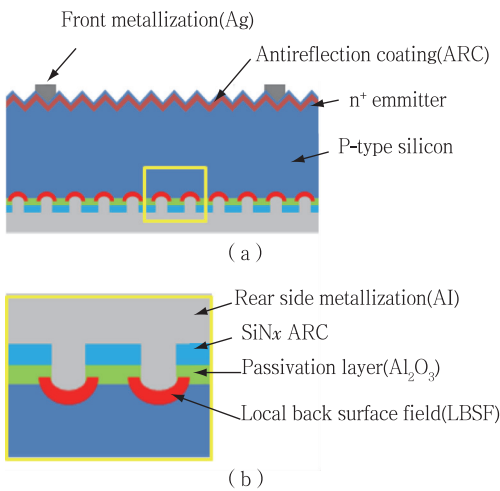


图 1 PERC 太阳能电池结构示意图

2.1 铝浆黏度测试结果

铝浆印刷时,黏度过大会导致铝浆粘在网版上,产生漏印或印刷不均匀的缺陷,而黏度过小会发生漏浆或粘版的情况,所以黏度是判断铝浆印刷性能的重要指标。为了判断不同硼添加剂对铝浆印刷性能的影响,首先要进行黏度测试。通过旋转流变仪测试了不同剪切速率下的黏度值,由于铝浆印刷时,刮刀速度缓慢,此时剪切速率较小,因此选用剪切速率为 9.61 s<sup>-1</sup>时的黏度值衡量铝浆的印刷性能。由表 1 可以看出,添加  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$  后,铝浆黏度值几乎不变,说明此种添加剂能够很好地溶于有机溶剂并混合均匀,不改变铝浆的印刷性能。添加  $H_3BO_3$  添加剂后,黏度增长不大,维持在 35 Pa·s 以下,符合铝浆印刷要求。当添加  $B_2O_3$  添加剂后,黏度值增长幅度很大,当添加的质量分数为 1.5%时,黏度过高无法进行印刷。这是因为  $B_2O_3$  添加剂的颗粒度较大,不能很好地溶于有机溶剂。从黏度方面可以看出, $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ 与此配方

表 1 加入不同硼添加剂的铝浆黏度测试结果 Pa·s

添加剂	硼添加剂质量分数/%				
	0	0.5	0.8	1.0	1.5
$B_2O_3$	21.423	40.485	55.752	63.790	79.881
$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	21.423	20.326	22.109	22.590	21.071
$H_3BO_3$	21.423	28.388	30.627	34.882	34.213

铝浆具有较好的相溶性,能够保证铝浆的印刷性能。

### 2.2 翘曲测试结果

PERC 太阳能电池片在制作组件时,需将电池片放在玻璃片下进行层压,过高的翘曲率会导致层压过程中电池片发生破裂,从而导致次品率会上升。这就要求电池片的翘曲率不能过大。由于印刷质量几乎保持恒定,所以翘曲率的大小和铝浆湿重有关,湿重越大,铝浆在烘干烧结过程中失去的质量也越大,会导致翘曲率上升。此外,PERC 电池片本身的厚度也对翘曲有影响,相同印刷条件,电池片越厚,翘曲率越低。从表 2 可以看出,总体上添加硼添加剂后,翘曲度呈上升趋势。添加硼添加剂后, $B_2O_3$ 相比于其他添加剂,翘曲率的增长低于其他的添加剂,当添加质量分数低于 0.8%时,翘曲率低于 3 mm,满足一般 PERC 电池片要求。而添加质量分数高于 0.8%时,翘曲率过高,从而会导致电池片在层压过程中的破裂现象增加。

表 2 加入不同硼添加剂的铝浆电池片翘曲测试结果

添加剂	mm				
	硼添加剂质量分数/%				
	0	0.5	0.8	1.0	1.5
$B_2O_3$	2.18	2.85	3	3.25	—
$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	2.18	2.95	2.55	3.38	3.4
$H_3BO_3$	2.18	3.2	3.45	3.58	3.5

### 2.3 电性能测试结果

电性能是太阳能电池的主要性能指标,分别对以  $B_2O_3$ 、 $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$  和  $H_3BO_3$  为添加剂时太阳能电池片的开路电压( $U_{oc}$ )、填充因子( $F_F$ )、铝层电阻( $R_{Al}$ )和转换效率( $\eta$ )进行测试<sup>[12]</sup>。图 2(a)为硼添加剂不同添加量的开路电压,由图中可以看出,添加质量分数为 1.0%的硼添加剂后, $U_{oc}$ 值最大,其中,添加了  $B_2O_3$ 的开路电压最大,平均值达到了 662 mV,相较于未添加样,增加了 6 mV。而另外两种添加剂也有小幅提升。结果表明,随着硼添加剂添加量的增大, $U_{oc}$ 也随之增大。当添加量达到 1.5%时,开路电压会降低,这可能是因为添加剂过量,引入了一些过量的杂质元素造成的。从  $U_{oc}$ 方面考虑,在一定添加范围内,硼添加剂的加入能提高开路电压。图 2(b)为硼添加剂不同添加量的填充因子,填充因子主要受开路电压和短路电流综合作用影响,填充因子的大小能够体现出电池的实际效率,填充因子越大,则电池的实际效率越高。从图中可以看出添加了  $B_2O_3$ 和  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$  添加剂后,填充因子提升。其中  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$  添加剂的不同含量都提高了填充因子,当添加质量分数为 0.5%和 1.5%时,填充因子平均值最大,均达到 78.5%,相较于参比样增加了 2%。而当  $H_3BO_3$ 作为添加剂时,填充因子反而降低了,这说明  $H_3BO_3$ 添加剂对于开路电压和短路电流的综合作用没有明显的提升<sup>[13]</sup>。

图 2(c)为硼添加剂在不同添加量时铝层电阻的结果。铝层电阻的高低表明铝浆经过烧结后与硅片欧姆结合的好坏, $R_{Al}$ 越低则欧姆结合越好。结果表明, $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ 和  $H_3BO_3$ 两种添加剂有效的促进了铝浆和硅层的欧姆结合, $R_{Al}$ 最低为 62  $\Omega$ ,与参比样相比降低了 30%。而  $B_2O_3$ 作为添加剂时,铝层电位没有明显改进,这可能是由于  $B_2O_3$ 的颗粒度过大,分布不均匀,只有少量的  $B_2O_3$ 参与了反应,从而体现不出硼添加剂对欧姆结合的促进作用。图 2(d)为硼添加剂在不同添加量时的光电转换效率,电池片的转换效率是衡量电池片是否合格的最根本指标。转换效率受到开路电压、填充因子和铝层电阻等因素的影响,其中以转换效率为主要电性能指标来评价 3 种硼添加剂。当  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$  添加剂的添加质量分数为 1.0%时,电池片转换效率提升最高,平均值达到了 20.2%,相比于参比样电池效率增长了 0.8%。由图 2(d)看出,硼添加剂的加入对转换效率的提升具有较明显的促进作用。



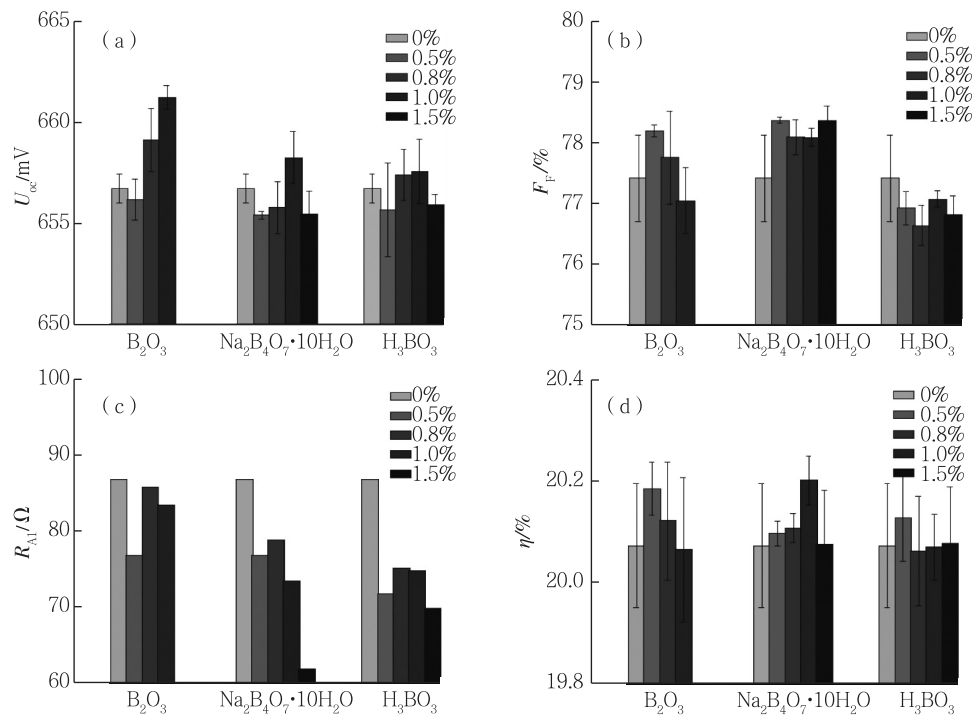


图 2 PERC 太阳能电池电性能结果图

2.4 铝浆形貌表征

图 3 为 PERC 太阳能电池片的横截面 SEM 图。从 SEM 图中可以清晰的看出具有同心圆弧状结构的 LBSF 层,将局部开口进行均匀的包裹,成为铝浆和硅层接触处的过渡层。LBSF 层是烧结过程中硅和铝发生互扩散形成的铝硅合金结构。铝硅合金上面散布着一些球状的铝粉颗粒以及一些细小的玻

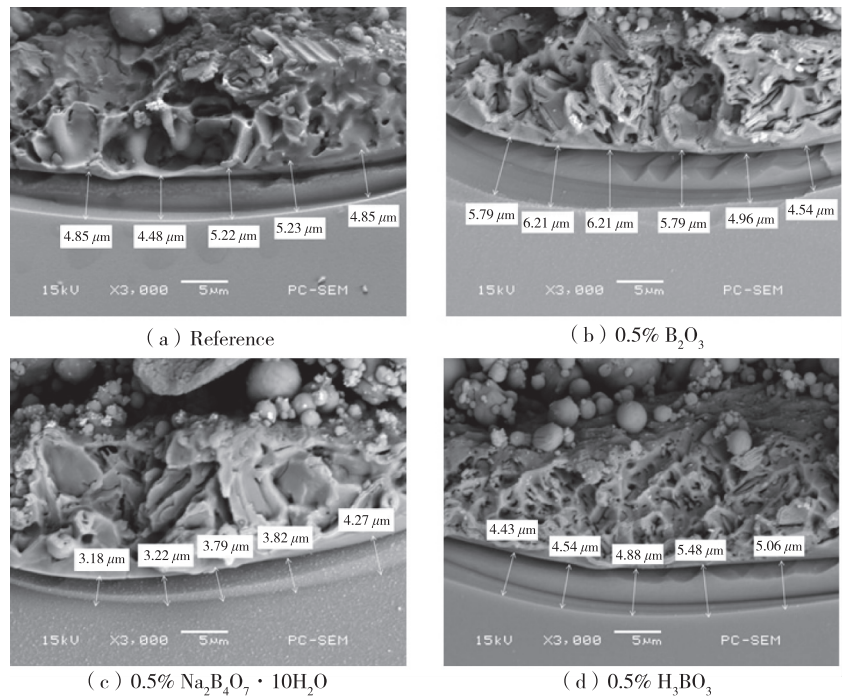


图 3 PERC 太阳能电池片 LBSF 层 SEM 图

璃粉。通过测量各样品中 LBSF 层的厚度可以看出(表 3), LBSF 层的厚度( $\delta$ )大小顺序为: $\delta(\text{B}_2\text{O}_3) > \delta(\text{H}_3\text{BO}_3) > \delta(\text{Ref.}) > \delta(\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O})$ 。其中,图 3(c)的 LBSF 层厚度有些不均匀,但最厚处与 Ref.厚度差不多。LBSF 层厚度的结果与图 2(d)中的转换效率趋势几乎一致,因此可以得到 LBSF 层的厚度与电性能转换效率成正比的结论。LBSF 层越厚,PERC 太阳能电池电性能越好;LBSF 层厚度越小,则体系的电阻越高,此时太阳能电池的光电转换效率也会降低。

表 3 PERC 太阳能电池的 LBSF 层厚度

添加剂	质量分数/%	LBSF 厚度/ $\mu\text{m}$
—	0	$4.926 \pm 0.312$
$\text{B}_2\text{O}_3$	0.5	$5.583 \pm 0.685$
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	0.5	$3.656 \pm 0.458$
$\text{H}_3\text{BO}_3$	0.5	$4.878 \pm 0.421$

## 2.5 样品的 XRD 分析

图 4 为分别向铝浆中添加  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  等硼添加剂烧结制备铝浆层的 XRD 谱图。从图中可以看出,包括未添加硼添加剂样品在内的 4 组样品出现的衍射峰位置和相对强度均相同。图中各样品中出现的衍射峰均对应着  $\text{Al}_{3.21}\text{Si}_{0.47}$  合金(JCPDS No.41-1222)的衍射峰。这一方面表明,硅片中的硅原子会在高温退火的过程中向铝层中扩散,形成铝硅合金;另一方面,添加硼添加剂之后的衍射峰与未添加硼添加剂的样品衍射峰相同,说明添加微量的硼添加剂不会影响形成铝硅合金的晶格结构。

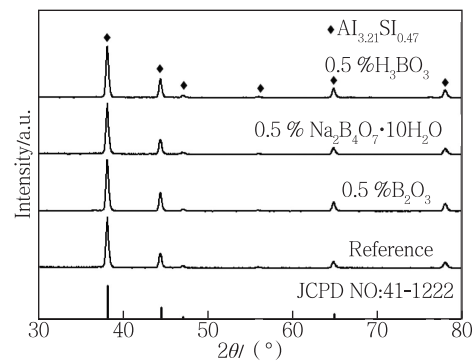


图 4 添加 3 种质量分数为 5% 的硼添加剂后各样品的 XRD 谱图

## 2.6 硼添加剂影响机理研究

为了进一步了解 LBSF 层的形成过程,我们通过 EDS 对 PERC 太阳能电池片中不同区域的硅含量进行了表征。图 5(a)为未添加硼添加剂时的参比试样,靠近 LBSF 层处铝硅合金中的硅含量为 12.82%,接近于铝硅二元相图中共晶点成分 12.6%,说明参比试样的中的铝硅合金为共晶合金。而位置接近铝层界面处硅含量增加最高,达 16.46%,说明通过扩散至铝层的硅会在界面处聚集。图 5(b)和图 5(c)中硅含量的分布趋势与图 5(a)中基本一致。但不同的是,添加硼添加剂的铝硅合金的硅成分都大于共晶成分点,分别达到了 17.08%和 14.96%,说明有硼添加剂存在时,扩散进入 LBSF 层的硅原子含量增加。此外,交界处和铝层中的硅含量都有所增加,但增长量都不明显,说明界面处和铝层中扩散进入的硅含量基本相同,受到硼添加剂影响的主要为 LBSF 层中铝硅扩散的程度。EDS 结果显示,添加相同质量分数的条件下(0.5%), $\text{B}_2\text{O}_3$ 作为添加剂时 LBSF 层中硅含量要明显高于  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  作为添加剂时。可以推断,硼添加剂会促进硅向铝层中的扩散,从而使共晶合金中的硅含量增加,促进了铝硅合金的形成。图 3 中  $\text{B}_2\text{O}_3$ 添加剂试样 LBSF 厚度最大,是由于其在相同添加量时其硼元素的含量更高。而  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 添加剂硼含量较少,增加量不明显。因此,硼元素的加入会引起 LBSF 层厚度的变化,从而影响直接影响 PERC 太阳能电池的电性能。

根据 SEM 和 EDS 的结果可以推断出硼添加剂作用于 LBSF 层可能的机理。如图 6(a)所示,未添加硼添加剂时,烧结过程中铝硅发生互扩散,这种情况下,铝硅合金为未发生偏移的共晶合金。如图 6(b)所示,添加硼添加剂之后,铝硅硼 3 种元素发生互相扩散,此时硅元素向铝层中的扩散含量会增加。由于 LBSF 层是在烧结过程中的冷却时,溶解在铝硅合金中的硅元素再结晶造成的。溶解在铝硅合金中的硅元素越多,则最后电池片中 LBSF 层越厚,从而可以进一步改善 PERC 太阳能电池的电性能。

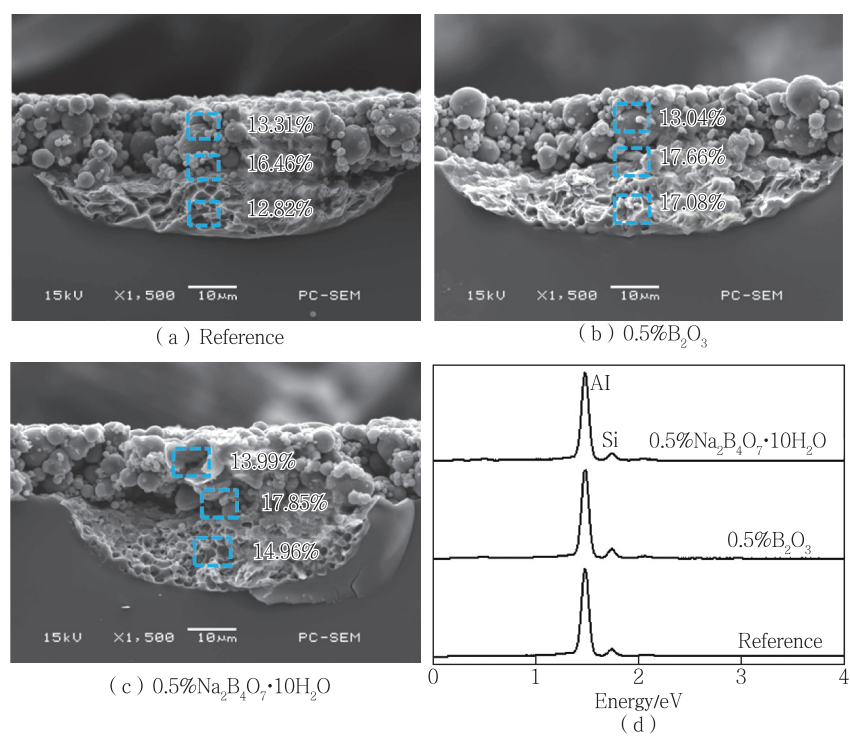


图 5 PERC 太阳能电池片横截面硅含量 EDS 图

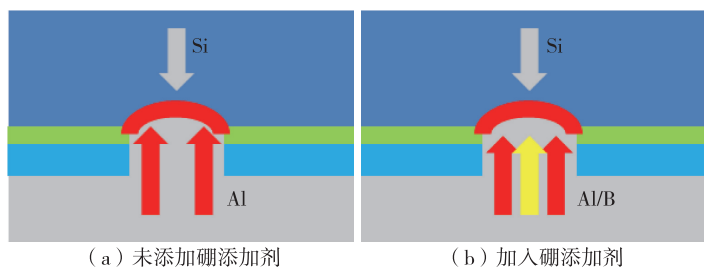


图 6 硼添加剂作用机理图

3 结 论

通过添加不同的硼化合物对铝浆性能进行调控。对比铝浆的印刷性能和电性能测试结果,结合 SEM 和 EDS 测试结果发现,加入硼添加剂时 LBSF 的厚度增大,可能是由于硼元素能够增加铝原子与硅原子之间的互扩散,从而使铝硅共晶合金中的硅含量上升。当冷却时,铝硅合金中会有更多的硅元素进行再结晶。综合考虑铝浆印刷性能和电性能,选用 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O 作为硼添加剂,添加量为 1.0% 时铝浆性能最佳。

参考文献:

[1]BLAKERS A W, WANG A, MILNE A M, et al. 22.8% efficient silicon solar cell[J].Appl Phys Lett, 1989, 55(13): 1363-1365.

[2]WANG A, ZHAO J, GREEN M A. 24% efficient silicon solarcells[J]. Appl Phys Lett, 1990, 57(6): 602-604.

- [3] FISCHER G, MULLER M, STECKEMETZ S, et al. Model based continuous improvement of industrial p-type PERC technology beyond 21% efficiency[J]. Energy Procedia, 2015, 77: 515-519.
- [4] SAGA T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial massproduction[J]. NPG Asia Mater, 2010, 2(3): 96-102.
- [5] 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 solarcells[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2016, 6(1): 68-73.
- [6] HORBELT R, EBERT S, ULBIKAITE V, et al. Al-density variation as one driving force for void formation in PERC solar cells[J]. Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Lett, 2016, 10(7): 515-519.
- [7] CHIU Y S, CHENG C L, WHANG T J, et al. Effects of silicate glasses in aluminum pastes on physical and electrical characteristics of screen-printed multi-crystalline silicon solarcells[J]. Mater Lett, 2014, 126: 143-146.
- [8] RAUER M, SCHMIGA C, GLATTHAAR M, et al. Alloying from screen-printed aluminum pastes containing boronadditives[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2013, 3(1):206-211.
- [9] IKEDA Y, TOMIZWA Y, ITOH H, et al. Investigation of rear localized back surface field formed from boron laser doping and screen-printed aluminum paste in high-efficiency solar cells[J]. Energy Procedia, 2016, 92: 404-411.
- [10] LIN C H, TSAI S Y, HSU S P, et al. Structural properties of the solidified-Al/regrown-Si structures of printed Al contacts on crystalline Si solarcells[J]. Solar Energy Mater and Solar Cells, 2008, 92(8): 986-991.
- [11] FANG H C, CHANG C C, LIU C P, et al. Effects of back surface textures on contact formation and solar cell performance[J]. J Electrochem Soc, 2010, 157(3): 246-249.
- [12] 吕伟, 房香, 董旭, 等. CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> 多晶薄膜的铁电光伏性能研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2016, 28(2): 20-23.
- [13] GREEN M A. The passivated emitter and rear cell (PERC): from conception to mass production[J]. Solar Energy Mater and Solar Cells, 2015, 143: 190-197.

(责任编辑:李艳)