

# 皮秒激光熔覆硼掺杂硅纳米浆料的实验研究

洪 捐<sup>1,2</sup> 宣容卫<sup>3</sup> 黄海冰<sup>3</sup> 黄因慧<sup>1</sup> 汪 炜<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

<sup>2</sup>盐城工学院机械工程学院, 江苏 盐城 224051

<sup>3</sup>中电电气(南京)光伏有限公司, 江苏 南京 211100

**摘要** 采用硼掺杂的硅纳米颗粒和有机载体混合配制的硅浆料作为原料,以标准太阳能电池工艺中的预处理硅片作为基底,在硅片背面丝网印刷硅浆料,烘干后形成硅纳米薄膜,经皮秒激光熔覆形成掺杂的硅熔覆层,同时硼元素扩散进入硅基片。采用激光形貌仪、扫描电子显微镜、二次离子质谱等手段分析了熔覆层的组织结构和硼元素的掺杂情况。结果表明,皮秒激光形成的硅熔覆层组织均匀致密,与基底之间结合紧密,无裂纹、孔洞等缺陷。硅熔覆层中的硼掺杂浓度最高达到  $3 \times 10^{19}$  atom/cm<sup>3</sup>,在硅基体内扩散深度为 0.5~1 μm。在中电电气(南京)光伏有限公司太阳能电池生产线上进行了电池制备实验,平均光电转换效率达到 20.3%。

**关键词** 激光技术; 硅浆料; 硼掺杂; 皮秒激光; 硅熔覆层; 太阳能电池

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0902006

## B-Doped Nano-Si-Paste by Picosecond Laser Cladding

Hong Juan<sup>1,2</sup> Xuan Rongwei<sup>3</sup> Huang Haibing<sup>3</sup> Huang Yinhui<sup>1</sup> Wang Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

<sup>2</sup>College of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu 224051, China

<sup>3</sup>China Sunergy (Nanjing) PV-Tech Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 211100, China

**Abstract** Silicon paste prepared by boron doped Si nanoparticles and organic carriers is used as the source. The Si wafers from the standard process of solar cells are used as the substrate. The Si paste is fully screen-printed on the preprocessed Si rear surface and dried, and then a homogenous B-doped Si cladding layer is formed by picosecond laser. During the process, B diffuses into the substrate. The structure of Si cladding layer and doping performance of B element are observed by laser scanning microscope, scanning electron microscope, and secondary ion mass spectroscopy. The results show that the Si cladding layer formed by picosecond laser is uniform and dense without cracks and voids. The highest B concentration in the cladding layer is about  $3 \times 10^{19}$  atom/cm<sup>3</sup>, and B is doped into the Si substrate for the depth of 0.5–1 μm. Cells with an average efficiency of 20.3% are fabricated on China Sunergy's production line.

**Key words** laser technique; silicon paste; boron doping; picosecond laser; silicon cladding layer; solar cell

**OCIS codes** 140.3390; 160.4236; 160.6000; 350.6050

## 1 引 言

随着激光技术的进步,激光设备成本不断降低,激光加工的稳定性不断提高,采用激光进行局部硼扩散

收稿日期: 2016-04-16; 收到修改稿日期: 2016-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(51475236)

作者简介: 洪 捐(1983—),男,博士研究生,讲师,主要从事特种加工及光伏技术方面的研究。

E-mail: jameshong@ycit.cn

导师简介: 汪 炜(1973—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事精密微细特种加工技术方面的研究。

E-mail: wangwei@nuaa.edu.cn

在高效晶硅太阳能电池尤其是钝化发射极背面全接触(PERC)太阳能电池领域有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。硼元素在硅基体内的扩散较慢<sup>[4]</sup>,一般需要较长时间和较高温度才能实现扩散。基于溴化硼(BBr<sub>3</sub>)、三氯化硼(BCl<sub>3</sub>)、乙硼烷(B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)和硼粉等传统硼源<sup>[5-7]</sup>的纳秒激光扩散技术已经非常成熟,但纳秒激光在硅片表面产生较大的热影响区和晶格缺陷,很大程度上制约了电池性能的提升<sup>[8-10]</sup>。皮秒或飞秒激光虽然热影响区小,但是由于皮秒或飞秒激光脉宽比机械加工材料的热扩散率短,大部分热量来不及在硅基体内传播就会被带走,无法实现硼元素的扩散<sup>[11-14]</sup>。所以研究一种既能够实现硼扩散又能获得较小热影响区的方法,将对提升太阳能电池性能有非常重要的意义。

采用硼掺杂纳米硅颗粒进行激光熔覆有以下优势。第一,纳米颗粒相对于体材料的熔点显著降低<sup>[15]</sup>,可以采用较低能量的激光进行熔化,对基底材料的热损伤小,使得采用皮秒或飞秒激光加工成为可能。第二,纳米硅颗粒中的硼元素具有强烈脱氧和自熔作用<sup>[16]</sup>,硅元素润湿性良好,而且跟基体材料相同,经熔覆后易与基体材料形成良好的冶金结合。第三,硅纳米颗粒本身掺杂硼元素,激光熔覆后可以转化为掺杂的硅熔覆层,同时也可以扩散进入硅基体,实现硼元素的局部掺杂。

本文采用硼掺杂硅纳米浆料作为硼源,以中电电气(南京)光伏有限公司光伏太阳能电池生产线提供的预处理硅片作为基片,硅片经背面钝化后丝网印刷硅浆料(SP),快速烘干后形成硅纳米薄膜,选用皮秒激光进行熔覆实验,设置合适的激光参数,制备形成硼掺杂硅熔覆层的同时使得硼元素扩散进入硅基片。采用激光形貌仪、扫描电子显微镜(SEM)、二次离子质谱(SIMS)等手段分析了熔覆层的组织结构和硼元素的扩散情况。利用中电电气(南京)光伏有限公司常规的 PERC 电池生产线,引入硅浆料的激光熔覆工艺,制备了新型的 PERC 太阳能电池,并检测了电池各项参数,分析性能变化的原因。

## 2 实验材料及方法

实验选取尺寸为 156 mm×156 mm,厚度为 180 μm,电阻率为 1~3 Ω·cm 的 P 型直拉单晶硅片,经过常规 PERC 电池的预处理工序(清洗,制绒,正面磷扩散,背面抛光后镀膜)后作为基片。硅纳米浆料由 25% (质量分数)的直径约为 30 nm 的硼掺杂硅纳米颗粒(硼元素掺杂浓度约为 4.5×10<sup>19</sup> atom/cm<sup>3</sup>)和 75%的有机载体混合而成。课题组已经对该配方的硅浆料在硅基片表面的印刷及热扩散性能进行了详细的研究<sup>[17]</sup>。

皮秒激光熔覆硅浆料的实验步骤如图 1 所示。首先选用镀膜后的预处理硅片作为基片,在背面丝网印刷硅浆料,经过 550 °C 烘干 10~30 s 后,采用美国相干公司皮秒激光器进行熔覆实验。其他实验参数不变时,随着激光脉冲宽度的增加,激光输出的单脉冲能量随之降低<sup>[18]</sup>,这会影影响激光熔覆过程中掺杂元素的扩散深度以及熔覆层的重熔深度。由于设备条件限制,需保持光斑直径及脉冲宽度不变,仅阐述激光功率、重复频率和扫描速度对加工效果的影响。激光器的波长为 532 nm,平均功率为 1~15 W,光斑直径为 40 μm,重复频率为 100~1000 kHz,扫描速度为 1~12 m/s。

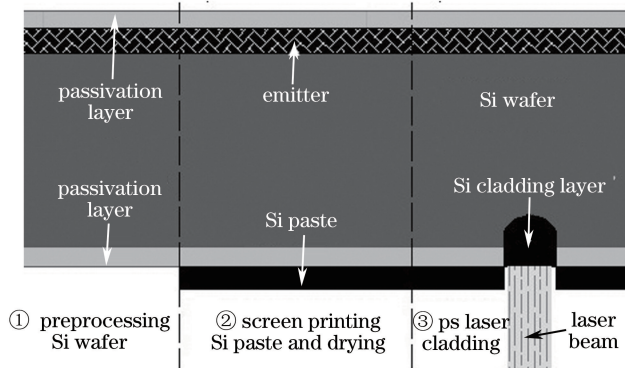


图 1 皮秒激光熔覆硅浆料流程图

Fig. 1 Flow diagram of cladding silicon paste by ps laser

激光熔覆的前提是激光产生的能量在加工材料表面被吸收并转化为热能。在不同的功率密度下,激光光束作用的材料表面区域发生不同的变化。伴随激光能量被吸收,物质温度升高,导致材料被加热,发生熔

融,气化,直至产生等离子体云等现象<sup>[19]</sup>。一般说来,在不同数量级的激光功率密度作用下的材料表面发生的物理现象如表 1 所示。

表 1 材料表面状态与激光功率密度的对应关系

Table 1 Correspondence between the surface state of the material and the laser power density

Laser power density / (W/cm <sup>2</sup> )	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>8</sup> -10 <sup>10</sup>
Surface state	Heating	Melting	Vaporization	Plasma

根据功率密度的计算公式可知<sup>[20-21]</sup>,平均功率密度等于平均功率除以光斑面积。经计算实验采用的皮秒激光器平均功率密度范围约为  $1 \times 10^4 \sim 1.19 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup>,为保证材料充分熔化而不至于气化,实验皮秒激光功率选择 10 W,对应平均功率密度为  $7.9 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup>。实验采用激光的具体参数如下:激光器型号为 Solar Laser-Pro Hyper Rapid 25,平均功率为 10 W,重复频率为 200~800 kHz,扫描速度为 3~10 m/s。通过改变重复频率可以调节峰值功率及能量密度,通过调节扫描速度来调节熔覆时间。

实验采用激光形貌仪分析硅浆料经不同皮秒激光参数加工后硅熔覆层的表面形貌,以获得合理的激光加工参数。采用无水乙醇清洗去除多余硅浆料后,采用 SEM 分析熔覆层的横截面形貌,进一步观测熔覆层内部的组织结构。采用 SIMS 分析激光熔覆区域硼元素的分布状况。最后,利用中电电气(南京)光伏有限公司 30 MW 电池生产线按照标准电池片生产的工艺步骤完成后续工序(包括背面印刷铝浆料、正面印刷银浆、共同烧结等),测试电池片的光电转换效率,分析效率变化的原因。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 皮秒激光熔覆硅浆料的过程分析

采用激光形貌仪分析皮秒激光熔覆硅浆料的过程,如图 2 所示。图 2(a)表示预处理硅片,作为激光熔覆的基片。图 2(b)表示在预处理硅片表面丝网印刷一层硅浆料,从图中可以看出,硅浆料致密地覆盖在硅片表面,经烘干后有机载体挥发,形成一层硅纳米薄膜。图 2(c)表示经皮秒激光熔覆后形成一条宽度为 40 μm 左右的直线,该尺寸与光斑的直径基本相同。经表面粗糙度测量发现该区域为激光熔覆硅浆料后的区域,硅薄膜厚度减小约 10 μm,熔覆区域边界清晰,边缘陡峭,激光熔覆区域与未加工区域能明显区分,体现了皮秒激光器热影响区小的优势。为进一步分析激光熔覆区域的表面一致性,观测该区域的三维等高线图

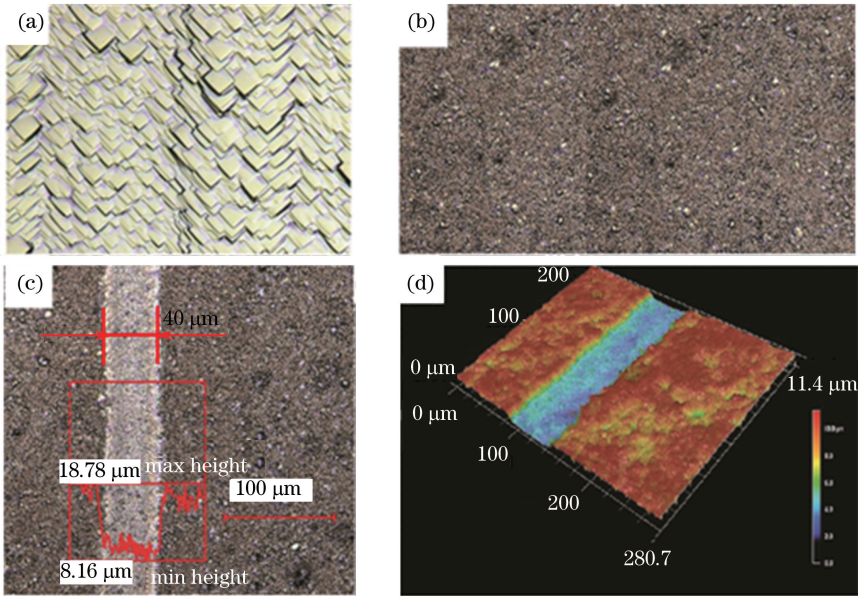


图 2 皮秒激光熔覆硅浆料的激光形貌仪图片。

(a) 预处理硅片;(b)印刷硅浆料;(c)激光熔覆表面;(d)激光熔覆表面的三维等高线图

Fig. 2 Microscopic laser profiles of ps laser cladding process. (a) Preprocessed Si wafers; (b) screen printed Si paste; (c) rear surface after ps laser cladding; (d) three-dimensional contour map of laser cladding surface

图,如图 2(d)所示。从图中可以看出熔覆区域的表面平整,与未加工区域分界明显,熔覆区域硅薄膜减薄约  $10\ \mu\text{m}$ ,与粗糙度的测量基本吻合。另外未加工区域表面平整,表明硅浆料印刷均匀,保证了激光熔覆过程中熔覆层的整体稳定性。

### 3.2 皮秒激光参数选取

根据能量密度的计算公式<sup>[20-21]</sup>,能量密度等于单位脉冲能量除以光斑面积,单位脉冲能量等于平均功率除以重复频率。由于平均功率及光斑面积基本保持不变,所以激光的能量密度只与重复频率有关,且随着重复频率的增加而降低。扫描速度主要控制激光的加工时间。为检测方便,将多余的硅浆料去除后,采用激光形貌仪观测不同重复频率及扫描速度下硅基片上熔覆层的表面形貌,如图 3 所示。图 3(a)为重复频率 800 kHz、扫描速度 10 m/s 条件下进行激光熔覆,由图中可见硅薄膜熔覆不充分,边缘模糊,熔覆层宽约  $30\ \mu\text{m}$ ,小于光斑直径,由此可见此激光参数下熔覆效果不佳。主要原因可能是重复频率选择偏高,能量密度较小,也有可能是扫描速度过快导致。保持扫描速度不变,改变重复频率,选择 200 kHz,如图 3(b)所示。图中显示激光熔覆后,熔覆层宽度为  $40\ \mu\text{m}$ ,硅薄膜熔覆较充分,但是边界仍较为模糊,并且熔覆层边缘出现较明显的热影响区,所以在此激光参数下形成的硅熔覆层仍然不能满足要求。主要原因在于能量密度较大,扫描速度过快。图 3(c)采用 400 kHz 重复频率、3 m/s 扫描速度进行激光熔覆,增加重复频率的同时降低扫描速度,由图可见熔覆层宽度仍为  $40\ \mu\text{m}$ ,边缘变得非常清晰,但是出现了明显的光斑重叠现象,由此可判断此时的重复频率基本达到要求,但是扫描速度较慢导致光斑耦合,此时的激光参数仍然不能满足要求。图 3(d)为采用 400 kHz 重复频率、6 m/s 扫描速度进行熔覆,由图可见硅熔覆层边缘清晰,一致性好,达到了理想的熔覆效果。

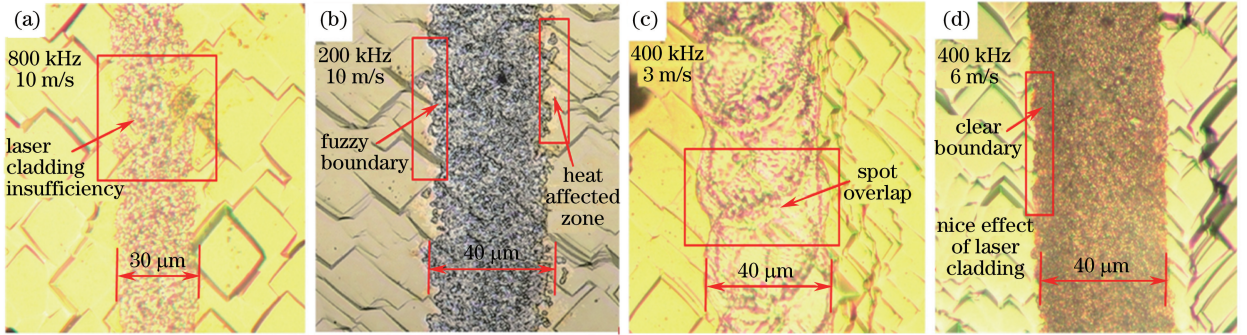


图 3 不同重复频率及扫描速度下硅片表面硅薄膜激光熔覆的激光形貌仪检测结果

Fig. 3 Microscopic laser profiles of ps laser cladding under different repetition rate and scanning speed

### 3.3 硅熔覆层组织结构分析

皮秒激光参数选用功率 10 W,重复频率 400 kHz,扫描速度 6 m/s 进行激光熔覆时,从表面形貌看,熔覆效果基本满足要求。为进一步分析该激光参数下硅熔覆层与基体材料的结合情况,研究内部有无裂纹和孔洞等缺陷,采用 SEM 对硅熔覆层的横截面进行分析,结果如图 4 所示。图 4(a)显示经皮秒激光熔覆硅纳米薄膜后形成的熔覆层宽度  $W = 35 \sim 40\ \mu\text{m}$ ,熔覆层重熔深度  $h = 8 \sim 10\ \mu\text{m}$ ,熔覆层高度  $H = 10 \sim 12\ \mu\text{m}$ 。

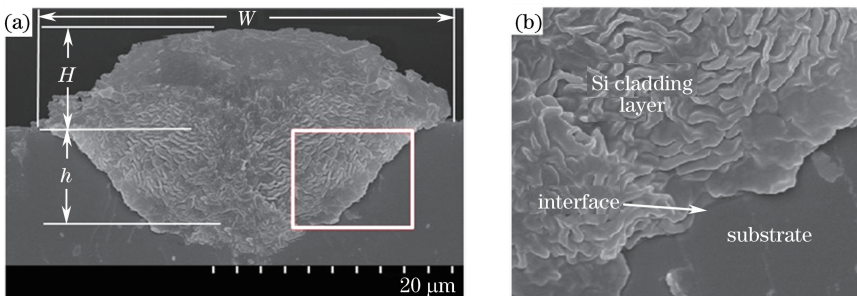


图 4 硅熔覆层 SEM 图像。(a)硅熔覆层横截面组织结构;(b)硅熔覆层界面区域的局部放大图

Fig. 4 SEM images of (a) the cross-section morphology and (b) enlarged interface region of Si cladding layer

由于光斑中心区域温度最高,硅基体材料内重熔区域中间位置深度最大,向两边逐渐减薄。而纳米颗粒的熔点相对较低,所以硅基体表面熔覆区域的厚度向两侧减薄并不明显。整个硅熔覆层组织结构致密,无裂纹、孔洞等缺陷。图 4(b)为硅熔覆层界面区域的局部放大图,从图中可以看出熔覆层内组织均匀,结构致密,具有明显的蠕虫状结晶生长特征,与硅基体呈冶金结合。

### 3.4 皮秒激光熔覆过程中硼元素扩散状况分析

硅熔覆区域中硼元素掺杂分布如图 5 所示。从图中可见,硼元素的浓度分布有三个明显变化的深度区域:1) 0~10  $\mu\text{m}$  为硅熔覆层区域,该区域掺杂浓度最高,约为  $3 \times 10^{19} \text{ atom/cm}^3$ ,基本保持不变;2) 10~17  $\mu\text{m}$  为重熔层区域,该区域掺杂浓度从 10  $\mu\text{m}$  开始略有下降,最低浓度在 17  $\mu\text{m}$  附近,约为  $1.6 \times 10^{19} \text{ atom/cm}^3$ ;3) 17~18  $\mu\text{m}$  为硅基体区域,该区域掺杂浓度快速下降。从表面至 16  $\mu\text{m}$  深度范围内硼元素掺杂浓度基本保持不变,证明硅熔覆区域的组织致密,结构一致性较好。此外,由于硅纳米薄膜与硅片之间硼元素掺杂浓度差别较大,在表面以下深度为 17  $\mu\text{m}$  左右区域出现掺杂浓度快速降低的情况,该区域的位置接近熔覆层与硅基体结合的界面位置,从该区域向硅基体内硼元素扩散了 0.5~1  $\mu\text{m}$ 。SIMS 检测结果与硅熔覆区域横截面 SEM 结果基本吻合,证明硅浆料烘干后形成的硅纳米薄膜,经皮秒激光熔覆后在形成了一层致密的硼掺杂熔覆层的同时硼元素还向硅基体内实现了浅扩散。

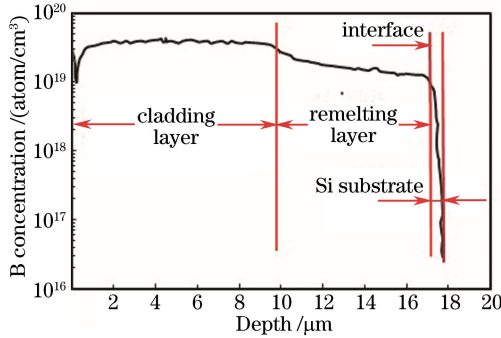


图 5 硅熔覆区域中硼元素掺杂浓度的 SIMS 分析

Fig. 5 Boron doping profile in the Si cladding layer measured with SIMS

### 3.5 采用硅熔覆结构的太阳能电池性能分析

由图 6 可知,相对于传统的 PERC 电池,采用硅熔覆结构工艺路线制备的 SP-PERC 电池在原有工艺的基础上仅增加 3 步工序,即丝网印刷硅浆料、激光熔覆、去除多余硅浆料,其余步骤与传统的 PERC 电池工艺路线完全相同,而且新的工艺路线未增加新设备。

同一生产线制备的 SP-PERC 以及常规 PERC 电池各项参数如表 2 所示。其中 SP-PERC 电池的开路电压( $V_{oc}$ )和电流密度( $J_{sc}$ )略有提升,填充因子( $F$ )提升了 0.6%,串联电阻( $R_s$ )降低较明显,电池平均效率

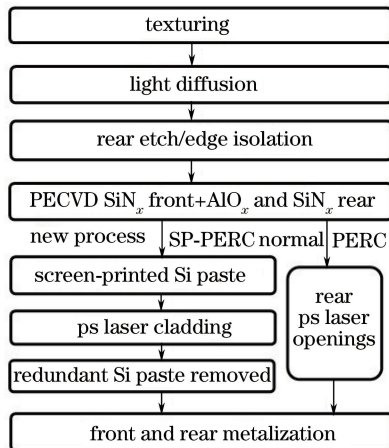


图 6 利用硅浆料制备 SP-PERC 电池和普通 PERC 电池工艺流程图

Fig. 6 Process flow diagram for fabrication of SP-PERC using Si paste and normal PERC

( $E_{ff}$ )提升了 0.3%。主要原因在于传统的 PERC 电池背场开线区域在铝浆料烧结形成硅铝合金层的过程中容易形成孔洞,此外局部铝背场在降低接触电阻及表面复合方面的作用小于局部硼背场。由此可见得益于硼掺杂硅熔覆层的存在,一方面减少了背场孔洞的形成,使得填充因子大幅提升;另一方面局部硼背场降低了 SP-PERC 电池的串联电阻,最终使得电池效率得以提升。

表 2 SP-PERC 以及 PERC 电池的各项参数(100 片电池为一组, $E_{ff}$ 代表平均效率,偏差 $\pm 0.1$ )

Table 2 Parameters of SP-PERC and PERC cells (100 cells from one batch of substrate as a group,

$E_{ff}$  represents average efficiency with deviation of  $\pm 0.1$ )

Cell group	$V_{oc}/mV$	$J_{sc}/(mA \cdot cm^{-2})$	$F/\%$	$E_{ff}/\%$	$R_s/(\Omega \cdot cm^2)$
SP-PERC	658	39.08	78.9	20.3	0.46
PERC	655	38.95	78.3	20	0.55

## 4 结 论

当皮秒激光平均功率为 10 W,重复频率为 400 kHz,扫描速度为 6 m/s 时熔覆硅浆料,获得较好的熔覆效果。形成的硅熔覆层宽度为 35~40  $\mu m$ ,熔覆层重熔深度为 8~10  $\mu m$ ,熔覆层高度为 10~12  $\mu m$ 。熔覆层组织均匀致密,与基体之间结合紧密,无裂纹、孔洞等缺陷。硅纳米颗粒中硼掺杂浓度为  $4.5 \times 10^{19} \text{ atom/cm}^3$ ,激光熔覆后硅熔覆层中硼元素掺杂浓度为  $3 \times 10^{19} \text{ atom/cm}^3$  左右,重熔区域中硼元素掺杂浓度为  $1.6 \times 10^{19} \text{ atom/cm}^3$  左右。熔覆层表面以下深度为 17  $\mu m$  左右区域出现掺杂浓度快速降低的情况,该区域的位置接近熔覆层与硅基体结合的界面位置,证明硼元素扩散进入了硅基体,实现硼元素的局部掺杂,扩散深度为 0.5~1  $\mu m$ 。采用硼掺杂硅浆料作为硼源,利用皮秒激光熔覆制备的局部硼背场同时拥有冷加工与热加工的优点,获得较小热影响区的同时实现了硼元素向机体内的扩散。采用皮秒激光熔覆硅浆料的新工艺路线制备的 SP-PERC 电池的平均光电转换效率达到了 20.3%,相对于同批次的普通 PERC 电池效率提升了 0.3%,填充因子提升了 0.6%。

## 参 考 文 献

- Green M A. The passivated emitter and rear cell (PERC): From conception to mass production[J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2015, 143: 190-197.
- Kim M, Kim D, Kim D, *et al.* Analysis of laser-induced damage during laser ablation process using picosecond pulse width laser to fabricate highly efficient PERC cells[J]. Solar Energy, 2014, 108: 101-106.
- Lin D, Abbott M, Lu P H, *et al.* Incorporation of deep laser doping to form the rear localized back surface field in high efficiency solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2014, 130: 83-90.
- Wang Chunmei. Study on boron diffused silicon wafers[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008: 13-16.  
王春梅. 硼扩散片制备技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008: 13-16.
- Kluska S, Granek F. High-efficiency silicon solar cells with boron local back surface fields formed by laser chemical processing[J]. IEEE Electron Device Letters, 2011, 32(9): 1257-1259.
- Das A, Kim D S, Nakayashiki K, *et al.* Boron diffusion with boric acid for high efficiency silicon solar cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2010, 157(6): 684-687.
- Vinodkumar M, Korot K, Limbachiya C, *et al.* Screening-corrected electron impact total and ionization cross sections for boron trifluoride ( $BF_3$ ) and boron trichloride ( $BCl_3$ ) [J]. Journal of Physics B, 2008, 41(24): 245202.
- Kim M, Kim D, Kim D, *et al.* Impact of laser pulse width on laser ablation process of high performance PERC cells[J]. Solar Energy, 2014, 110: 208-213.
- Liu Chunyang, Sun Lidong, Fu Xing, *et al.* Si microstructure fabricated by 355 nm nanosecond pulsed laser and its fluorescence microscopy study[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2139-2142.  
刘春阳, 孙立东, 傅 星, 等. 355 nm 纳秒脉冲激光在硅表面照射形成微结构及其荧光检测[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2139-2142.
- Wang Kefu, Zhang Qihui. The ablation microstructures of mono crystalline silicon by high power nanosecond laser[J]. Laser Journal, 2012, 33(5): 36-37.  
王克甫, 张秋慧. 高能纳秒激光烧蚀单晶硅的微观结构[J]. 激光杂志, 2012, 33(5): 36-37.

- 11 Bähr M, Heinrich G, Stolberg K P, *et al.* Ablation of dielectrics without substrate damage using ultra-short-pulse laser systems[C]. Proceedings of the 25<sup>th</sup> EUPVSEC, Valencia, 2010: 2490-2496.
- 12 Yang Huan, Huang Shan, Duan Jun, *et al.* Contrastive study on laser ablation of single-crystal silicon by 1030 nm femtosecond laser and 355 nm nanosecond laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103003.  
杨 焕, 黄 珊, 段 军, 等. 飞秒与纳秒激光刻蚀单晶硅对比研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103003.
- 13 Jin Fangyuan, Chen Bo, E Shulin, *et al.* Theory analysis and experiment verification on picosecond laser ablation of Al film[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(6): 754-760.  
金方圆, 陈 波, 鄂书林, 等. 皮秒激光烧蚀 Al 膜的理论分析与实验验证[J]. 发光学报, 2014, 35(6): 754-760.
- 14 Hou Min. Study of micromachining on silicon using short and ultrashort laser pulse[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008: 9-22.  
侯 敏. 短脉冲及超短脉冲激光硅表面微加工研究[D]. 天津: 天津大学, 2008: 9-22.
- 15 Goldstein A N. The melting of silicon nanocrystals: Submicron thin-film structures derived from nanocrystal precursors [J]. Applied Physics A, 1996, 62(1): 33-37.
- 16 Dong Shiyun, Ma Yunzhe, Xu Binshi, *et al.* Current status of material for laser cladding[J]. Materials Review, 2006, 20(6): 5-9.  
董世运, 马运哲, 徐滨士, 等. 激光熔覆材料研究现状[J]. 材料导报, 2006, 20(6): 5-9.
- 17 Hong J, Wang W, Shi B, *et al.* Screen-printed Si paste for localized B doping in a back surface field[J]. IEEE Electron Device Letters, 2015, 36(1): 8-10.
- 18 Liu Qiang, Li Yangcong, Zhou Xin, *et al.* Study the relationship characteristic between laser's signal pulse energy and skeleton in experiment[J]. Laser Journal, 2009, 30(1): 20-21.  
刘 强, 李扬聪, 周 昕, 等. 激光脉冲输出能量与脉冲宽度相互关系特性实验研究[J]. 激光杂志, 2009, 30(1): 20-21.
- 19 李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 58-68.
- 20 陈家璧, 彭润玲. 激光原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 63-69.
- 21 鲍钢飞. 基础物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 420-430.