

## 多晶 PERC 太阳能电池的背面与正面结构性能优化\*

赵科巍<sup>1</sup>, 张波<sup>1</sup>, 吕镜<sup>2</sup>, 庄宇峰<sup>2</sup>, 李正平<sup>2</sup>, 鲁贵林<sup>1</sup>, 沈文忠<sup>2†</sup>

(1. 山西潞安太阳能科技有限责任公司, 山西 长治 046000;

2. 上海交通大学 物理与天文学院, 人工结构及量子调控教育部重点实验室, 太阳能研究所, 上海 200240)

**摘要:** 多晶硅太阳能电池以其价格低廉的优势成为低成本太阳能电池的首选, 但其光电转换效率提升空间有限。钝化发射极和背面电池 (PERC) 技术是当前晶硅太阳能电池提效的主要途径。多晶 PERC 电池结合了多晶硅电池的低成本和 PERC 电池的高效, 是当前多晶硅电池的研究热点。本文研究了多晶 PERC 电池的背面和正面结构优化与设计, 提出了提高多晶 PERC 电池效率的产业化技术方法。通过在硅片背面用三层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜来代替常规双层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜, 在保证优良的背面钝化的同时, 使电池长波响应得到改善, 电池光电转换效率由 20.19% 提升至 20.26%。优化多晶 PERC 电池的背面激光开窗工艺, 使多晶电池效率较常规工艺提升 0.11%。而在多晶 PERC 电池的正面叠加选择性发射极技术, 可较常规工艺提升电池效率 0.10%。综合运用多种提效手段有利于保持多晶 PERC 电池的竞争力。  
**关键词:** 太阳能电池; 多晶硅电池; 长波响应;  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜; 选择性发射极; 激光开窗

中图分类号: TK514; O472

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2020.05.011

## Optimization of the Structure and Performance of Back and Front of Multicrystalline Si PERC Solar Cells

ZHAO Ke-wei<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, LÜ Yi<sup>2</sup>, ZHUANG Yu-feng<sup>2</sup>, LI Zheng-ping<sup>2</sup>,  
LU Gui-lin<sup>1</sup>, SHEN Wen-zhong<sup>2</sup>

(1. Shanxi Lu'an Solar Energy Science and Technology Co., Ltd., Changzhi 046000, Shanxi, China;

2. Institute of Solar Energy, and Key Laboratory of Artificial Structures and Quantum Control (Ministry of Education), School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The multicrystalline silicon (mc-Si) solar cells have become the first choice of low-cost solar cells due to their low price, while the room for improving their photoelectric conversion efficiency is limited. Passivated emitter and rear cell (PERC) is the main technology for improving the efficiency of Si solar cells. Combing the low cost of mc-Si solar cells and high efficiency of PERC, the mc-Si PERC is paid more attention recently. A series of technologies based on the back and front structures optimization of mc-Si PERCs were studied for high efficiency and mass production in the present work. By employing layers of  $\text{AlO}_x/\text{triple-SiN}_x\text{:H}$  on the rear of mc-Si wafers, the long wavelength spectral response was strengthened while the rear surface passivation was keeping, and the average efficiency of PERC with  $\text{AlO}_x/\text{triple-SiN}_x\text{:H}$  layers was increased to 20.26% from the standard mc-Si PERC of 20.19%. The efficiency of the battery was improved by 0.11% through optimizing the rear electrode contacting patterns by laser ablation, compared with the standard mc-Si PERC. The efficiency increased by 0.10% when introducing selective emitter technology on the front of mc-Si PERC. The comprehensive applications of different methods for improving efficiency benefit to the competitiveness of mc-Si PERC.

**Key words:** solar cells; multicrystalline solar cells; long wavelength spectral response;  $\text{SiN}_x\text{:H}$  thin film; selective emitter; laser ablation

## 0 引言

最近几年, 传统铝背场太阳能电池 (aluminum backsurface field, Al-BSF) 逐渐被钝化发射极和背面

电池 (passivated emitter and rear cell, PERC) 所取代, 至 2019 年底全国 PERC 电池产能超过 100 GWp, 其中 p 型 PERC 电池在未来一段时间内仍将是光伏电池的主流产品。PERC 概念率先由 BLAKERS 等<sup>[1]</sup>

\* 收稿日期: 2020-05-12

修订日期: 2020-07-14

基金项目: 山西省重点研发计划项目 (201803D421097, 201903D121019)

† 通信作者: 沈文忠, E-mail: wzshen@sjtu.edu.cn

在 1989 年提出, 电池生产技术<sup>[2-3]</sup>的快速发展推动了 PERC 在这三十年由概念提出到大规模量产, 例如背介质涂层<sup>[4-5]</sup>、湿化学抛光刻蚀<sup>[6]</sup>、激光选择性发射极<sup>[7]</sup>和激光电极消融<sup>[8]</sup>。2009 年, 一种氧化铝/氮化硅结构<sup>[9]</sup>被提出可用作 PERC 背钝化膜, 至今仍被工业界采用<sup>[10]</sup>。2012 年, 无锡尚德电力成功利用激光技术<sup>[11]</sup>生产出选择性发射极 PERC 电池。2019 年, 西安隆基发布了单晶 PERC 电池效率最高为 24.06% 的世界纪录<sup>[12]</sup>, 而目前单晶 PERC 电池量产效率在 22% 以上<sup>[13]</sup>。值得注意的是, 现今单晶硅片的单价要比多晶硅片高一倍左右<sup>[14]</sup>, 不可避免地影响了光伏度电成本, 因此, 利用好多晶硅的成本优势, 提高多晶硅 PERC 电池的量产效率, 增强多晶硅太阳能电池的市场竞争力, 是目前晶体硅太阳能电池降本提效的重要途径。

提高光伏电池效率的重点是要把光学损失和电学损失降到最低, 因此, 晶体硅电池的结构与工艺改进对提高效率是至关重要的。本文通过改进多晶 PERC 电池的背面和正面结构, 研究和优化提高多晶 PERC 电池效率的产业化技术方法和方案。通过在硅片背面采用三层氢化氮化硅 ( $\text{SiN}_x\text{:H}$ ) 薄膜来代替常规双层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜, 保证优良的背钝化的同时, 电池长波响应得到改善, 多晶电池效率由 20.19% 提升至 20.26%。优化多晶 PERC 电池的背面激光开槽工艺, 使多晶电池效率较常规工艺提升 0.11%。在多晶 PERC 电池的正面叠加选择性发射极 (selected emitter, SE) 技术, 使得多晶电池效率较常规工艺提升 0.1%。若同时多晶 PERC 电池背面和正面叠加以上三项工艺的两项或三项, 预计还将进一步提高多晶 PERC 电池效率。

## 1 实验部分

图 1 为常规 PERC 电池结构示意图。实验中使用的 p 型多晶硅片尺寸为  $156.75 \text{ mm} \times 156.75 \text{ mm}$ , 厚度为  $200 \pm 20 \mu\text{m}$ , 电阻率为  $0.8 \sim 2 \Omega \cdot \text{cm}$ 。本研究并制备了四种结构的多晶 PERC 电池, 即常规 PERC (基准组)、背面三层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  钝化膜 PERC (实验组 1)、背面不同激光开槽图形的 PERC 电池 (实验组 3、4、5、6) 和正面叠加选择性发射极 PERC 电池 (实验组 2)。每组实验电池样品的数量均为 400 片。图 2 为电池的工艺流程示意图。

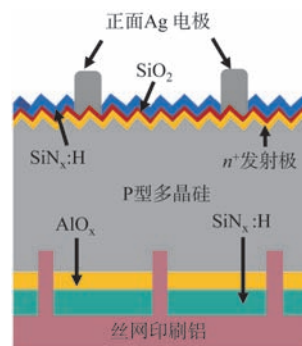


图 1 PERC 电池结构示意图

Fig. 1 Structure of standard PERC

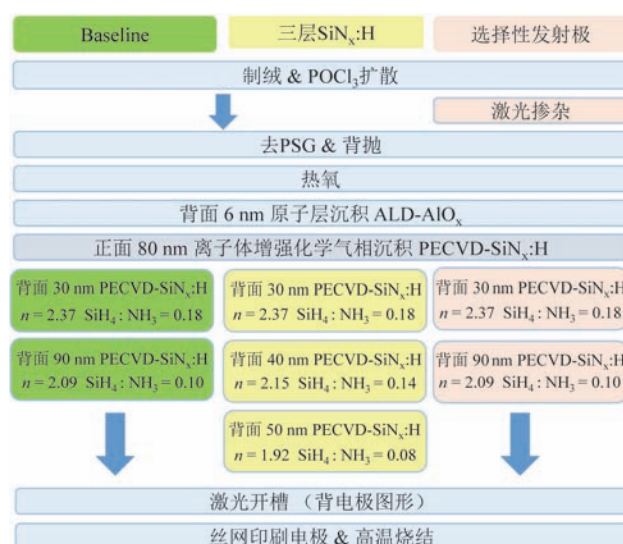


图 2 不同结构的 PERC 电池工艺流程图

Fig. 2 Process flows for the PERC with different structures

### 1.1 常规 PERC 电池制备

常规 PERC 电池在多晶硅太阳能电池标准的生产线上进行, 步骤如下: ①去损伤层、酸制绒和 RCA 湿式化学清洗; ② $\text{POCl}_3$  扩散形成  $n^+$  发射极, 方阻为  $130 \Omega/\square$ ; ③刻蚀、背抛及去磷硅玻璃层 (PSG); ④ $680^\circ\text{C}$  下进行热氧化 20 min; ⑤背面原子层沉积 (理想能源 ALD 原子层沉积设备) 约 6 nm 厚的  $\text{AlO}_x$ ; ⑥正面等离子增强化学气相沉积 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD, 中国电科四十八所 M82200-6/UM 型 PECVD) 沉积约 80 nm 厚的  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜; ⑦背面 PECVD 沉积 120 nm 厚的  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜, 具体分成两步: 先在里层沉积厚度为 30 nm、折射率为 2.37 的  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜, 再在外层沉积厚度为 90 nm、折射率为 2.09 的  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜; ⑧背面激光开槽 (武汉帝尔激光设备 DR-LA-Y40)

为形成局部接触做准备,激光开槽的线宽为  $40\pm 2\ \mu\text{m}$ ;  
⑨丝网印刷电极、高温烧结、测试分选。

## 1.2 背面三层 $\text{SiN}_x\text{:H}$ 钝化膜

背面三层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  钝化膜 PERC 电池在步骤⑦背面 PECVD 沉积中改变了  $\text{SiN}_x\text{:H}$  膜层分布:(1) 第一层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜保持不变,厚度仍为 30 nm,折射率仍为 2.37;(2) 减少第二层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜的厚度,由 90 nm 减至 40 nm,折射率为 2.15;(3) 增加第三层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜,厚度为 50 nm,折射率为 1.92。其他步骤保持不变。

## 1.3 背面不同激光开槽图形

针对不同激光开槽图形的电池,在步骤⑧的激光开槽部分采用四种不同的开槽实线与虚线图形,具体实验方案列于表 1。

表 1 激光开槽实验方案

Table 1 Experimental scheme of laser ablation

实验分组	实线长 / $\mu\text{m}$	虚线长 / $\mu\text{m}$	实虚比 / %
基准组	938	145	86.6
实验组 3	246	808	23.3
实验组 4	367	700	34.4
实验组 5	457	597	43.4
实验组 6	566	486	53.8

## 1.4 选择性发射极

选择性发射极 PERC 电池在步骤②扩散后增加了激光掺杂(武汉帝尔激光设备 DR-LA-Y40),在硅片正面形成轻掺区( $\text{n}^+$ 发射极),方阻为  $180\pm 10\ \Omega/\square$ ;重掺区( $\text{n}^{++}$ 发射极)的方阻为  $70\pm 5\ \Omega/\square$ 。

## 1.5 表征

实验中  $\text{AlO}_x$  和  $\text{SiN}_x\text{:H}$  的膜厚和折射率由椭偏仪(SE400adv-PV)测定。发射极掺杂浓度分布由电化学电容电压(德国 WEP 公司的 ECV 设备,型号 CVP21)测量。电池效率在  $25^\circ\text{C}$ 、AM1.5、1 个标准太阳的条件下用 Halm 3600 效率仪测试。

# 2 结果与讨论

## 2.1 背面三层 $\text{SiN}_x\text{:H}$ 钝化膜的影响

由于  $\text{SiN}_x\text{:H}$  膜层中 Si 含量增高,折射率和消光系数均相应增高,使得折射率更高的  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜具有更高的 Si—H 键密度,即更好的钝化效果<sup>[15]</sup>,但是  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜的折射率过高会导致严重的吸收损

失。为了兼顾  $\text{SiN}_x\text{:H}$  的钝化和减吸收效果,目前工业上采用背面双层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  膜层,即先沉积一层高折射率的  $\text{SiN}_x\text{:H}$ ,然后生长低折射率的  $\text{SiN}_x\text{:H}$ 。一方面,里层的高折射率  $\text{SiN}_x\text{:H}$  膜层可增加钝化效果,减少表面缺陷态,降低载流子复合的几率。另一方面,外层的低折射率  $\text{SiN}_x\text{:H}$  膜层可以有效减少背铝的光学吸收<sup>[16]</sup>。

常规双层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  结构虽然可以达到光学效果和钝化效果的平衡,但是背面的反射损失和吸收损失仍然损害着 PERC 电池的长波响应。根据光反射原理,采用三层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜通过不断降低折射率,能在保证  $\text{SiN}_x\text{:H}$  钝化效果的前提下,提高长波响应,这是由于从硅片表层向外的三层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜的折射率逐渐递减,能使入射的长波光子在内部多次反射和干涉,更大程度地增加了长波光子的利用率。本文中,实验组 1 即为三层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  结构,其中第一层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜的折射率为 2.37,保证了硅片的表面钝化效果。最外层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  薄膜(与铝接触的那一层)的折射率为 1.92,相比于常规双层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  中最外层的折射率 2.03,其更低的折射率使得在  $\text{Al}/\text{SiN}_x\text{:H}$  界面处形成“富氮层”,有效地减弱了铝浆的渗透,降低铝浆烧穿  $\text{SiN}_x\text{:H}$  形成  $\text{Al-Si}$  合金高复合层的几率<sup>[17]</sup>。传统铝背场电池由于受到背电极对长波光子的吸收,严重影响了电池效率的提升,因为一旦光子到达背面,会被金属层捕获而对电流没有贡献。传统铝背场电池背面金属层对光吸收的这一负面作用,在 PERC 电池中得到解决,主要得益于 PERC 电池背钝化膜对长波光子的反射,使光子利用率大大提高。而 PERC 电池背面三层  $\text{SiN}_x\text{:H}$  膜设计进一步减少光子在背面金属层被捕获的几率。

图 3a 为用 Wafer Ray Tracer 软件(PV Lighthouse 公司)模拟的双层  $\text{SiN}_x\text{:H}$ (基准组,模拟结构为 80 nm  $\text{SiN}_x\text{:H}/200\ \mu\text{m p-Si}/6\ \text{nm Al}_2\text{O}_3/30\ \text{nm SiN}_x\text{:H}/90\ \text{nm SiN}_x\text{:H}/1000\ \text{nm Al}$ )、三层  $\text{SiN}_x\text{:H}$ (实验组 1,模拟结构为 80 nm  $\text{SiN}_x\text{:H}/200\ \mu\text{m p-Si}/6\ \text{nm Al}_2\text{O}_3/30\ \text{nm SiN}_x\text{:H}/40\ \text{nm SiN}_x\text{:H}/50\ \text{nm SiN}_x\text{:H}/1000\ \text{nm Al}$ )在长波段的反射率与吸收率数据对比图。很明显,实验组 1 对光的吸收更少,反射回衬底的光也更多,长波响应更好,符合实验预期。图 3b 为基准组与实验组 1 的电池电性能对比图,其中  $V_{oc}$  是开路电压、 $I_{sc}$  是短路电流、 $FF$  是填充因子,  $\eta$  是效率。从图中可见,相较于基准组,实验组 1 的  $I_{sc}$  和  $V_{oc}$  均有小幅度提升,而  $FF$  保持不变(但明显可见实验组 1

的  $FF$  分布更为集中), 即  $I_{sc}$  和  $V_{oc}$  是效率提升的主要因素。基准组的效率为 20.19%, 实验组 1 的效率显著地提升了 0.07%, 可达 20.26%。其中,  $I_{sc}$  的提高是因为三层背膜具有更高的反射率, 验证了图 3a 的模拟结论。此外, 实验发现, 基准组的串联电阻  $R_s$  为 1.9 m $\Omega$ , 而实验组 1 的  $R_s$  为 1.7 m $\Omega$ , 这也是实验组 1 的  $I_{sc}$  更高的原因, 实验结果与理论相符。 $V_{oc}$  稍有提升, 这意味着背面采用三层 SiN<sub>x</sub>:H 膜结构, 钝化效果没有受到影响。

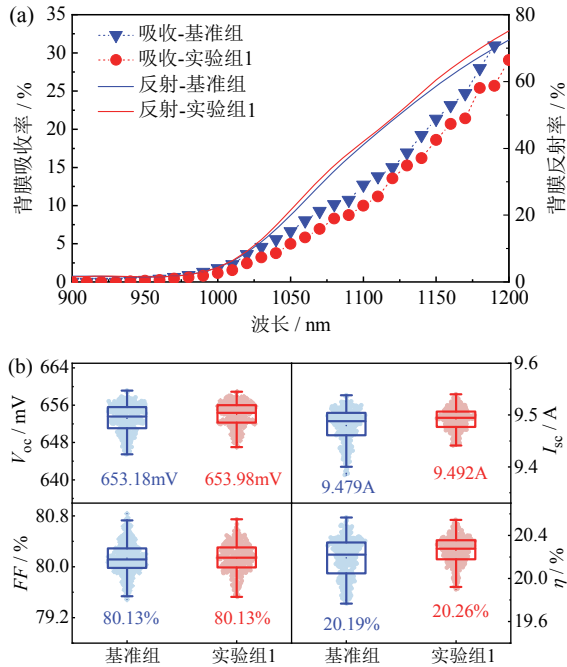


图 3 (a) 背膜的光吸收率和光反射率的模拟; (b) 基准组与实验组 1 的电性能对比

Fig. 3 (a) Simulated optical absorption and reflection from rear films; (b) measured  $I$ - $V$  parameters of group 1

## 2.2 背面不同激光开槽图形的比较

相对于传统 Al-BSF 电池, PERC 电池增加的工序之一就是背面激光开槽, 优化激光开槽图形将改善 PERC 电池性能。对于 PERC 电池, 背面金属电极的开槽设计在一定程度上决定了电池的光电性能, 需要同时兼顾钝化区域的损失和背电极对光子的吸收。常规 PERC 电池的激光开窗工艺采用虚线图形, 线段长 938  $\mu\text{m}$ 、线段间距 145  $\mu\text{m}$ 、线宽 40  $\mu\text{m}$ 、线距 600  $\mu\text{m}$ 。在保持线宽、线距不变后, 进行虚线线段图形的优化, 仅改变实虚比 (即  $L^R/L$ ,  $L = L^R + L^I$ , 其中  $L^R$  为线段长,  $L^I$  为线段间距), 设计了 4 种实虚比图形 (实验组 3 中  $L^R/L = 23.3\%$ , 金属占比 1.1%; 实验组 4 中  $L^R/L = 34.4\%$ , 金属占比 1.8%;

实验组 5 中  $L^R/L = 43.4\%$ , 金属占比 3%; 实验组 6 中  $L^R/L = 53.8\%$ , 金属占比 4.7%), 如图 4a 所示。

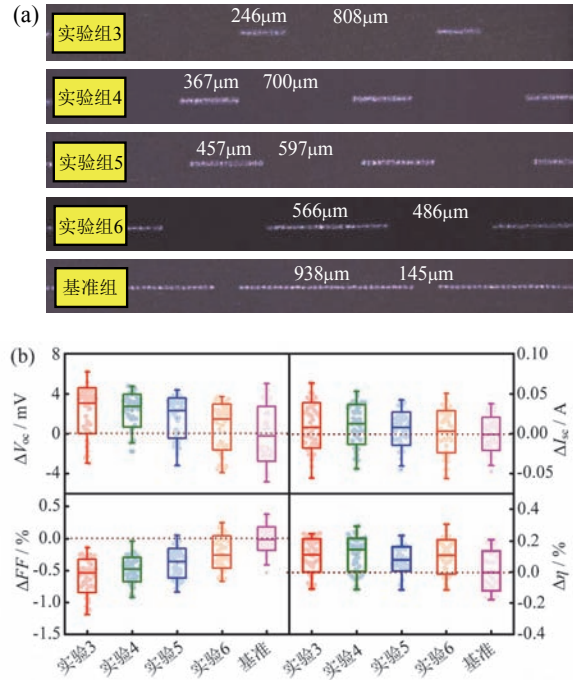


图 4 基准组与实验组 3、4、5、6 的激光开槽图形 (a) 及电性能对比 (b)

Fig. 4 Rear contacting patterns (a) and measured  $I$ - $V$  parameters comparison (b) of groups 3, 4, 5, 6 and baseline (relative value to baseline)

图 4b 是 4 个实验组与基准组的电性能对比图。从图中可见, 随着实虚比的增加,  $V_{oc}$  明显降低, 而  $FF$  显著提高, 这是由于串联电阻主要受横向传输电阻和接触电阻的影响<sup>[18-19]</sup>, 而实虚比越大, 金属占比越大, 横向传输电阻会减小, 使得串联电阻降低,  $FF$  提高。但是金属占比变大, 意味着非金属区域 (即钝化区域) 减少<sup>[20]</sup>, 这是  $V_{oc}$  明显降低的原因。因此, 通过增加激光开槽面积来提高电池效率不可取。除此以外, 可以发现 4 组实验组的  $I_{sc}$  均超过了基准组, 分别有 10 mA (实验组 3)、11 mA (实验组 4)、6.3 mA (实验组 5)、2.6 mA (实验组 6) 的增益, 这可能是背表面电流传输机制和电流收集的差异引起的。相较于基准组, 实验组 3 ~ 实验组 6 的平均转换效率分别有 0.10%、0.11%、0.085%、0.098% 的提升, 表明高  $V_{oc}$  和  $I_{sc}$  补偿了低  $FF$  导致的效率损失。结果显示, 实验组 4 具有最优的电池性能, 是激光开窗的最佳工艺。这说明设计激光开槽图形要同时考虑表面钝化和填充因子。若实虚比太大, 钝化区域的损失和背电极对光子的吸收会导致  $V_{oc}$  和  $I_{sc}$  的

降低；若实虚比太小，串联电阻的增加和铝硅接触性能的下降会导致  $FF$  的降低。

### 2.3 正面选择性发射极的结合

选择性发射极结构是在金属栅线下方形成重掺杂深扩散区 ( $n^{++}$ 发射极)，在其他钝化区域形成轻掺杂浅扩散区 ( $n^+$ 发射极)，这样一方面可以减少光生载流子复合，例如俄歇复合、Shockley-Read-Hall (SRH) 复合等<sup>[21-22]</sup>，提高钝化效果；另一方面可以提高金属电极区域的欧姆接触以减少接触电阻<sup>[23-24]</sup>。

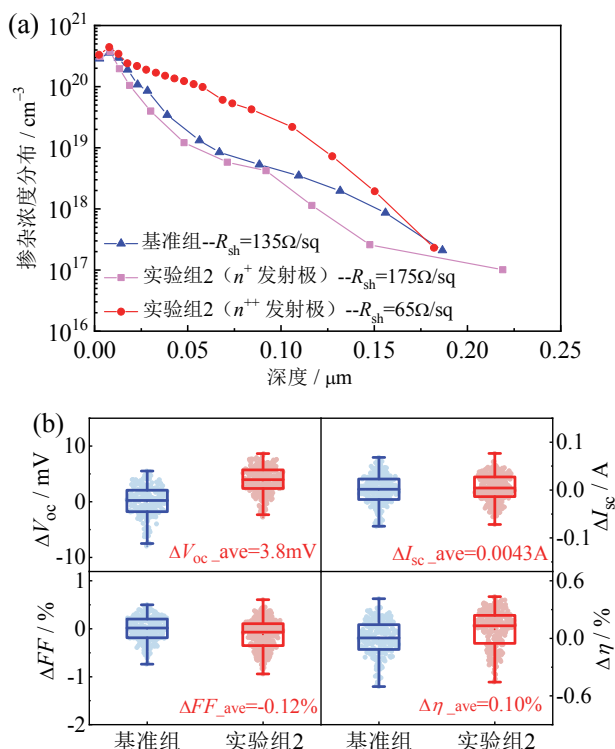


图 5 基准组与实验组 2 的磷掺杂浓度分布 (a) 及电性能对比 (b)

Fig. 5 Phosphorous dopant concentration profiles (a) and measured  $I$ - $V$  parameters comparison (b) of the emitters for baseline and group 2

电化学电容-电压法 (electrochemical capacitance-voltage, ECV) 测量扩散后的载流子浓度分布，可以获得电池的掺杂元素表面浓度、浓度变化曲线和结深等信息。图 5a 为常规太阳电池 (基准组) 与选择性发射极结构太阳电池 (实验组 2) 的磷掺杂浓度分布图。对于基准组，方阻  $R_{\square}=135\Omega/\square$ ，磷表面浓度为  $2.97 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ，结深  $0.14\mu\text{m}$ 。对于实验组 2， $n^+$  发射极  $R_{\square}=175\Omega/\square$ ，磷表面浓度  $1.96 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ，结深  $0.12\mu\text{m}$ 。通过激光掺杂， $n^{++}$  发射极  $R_{\square}$  降低至  $65\Omega/\square$ ，这是由于高能量密度的激光能瞬间熔融磷

硅玻璃，使磷原子扩散进入硅片表面，从而增加激光覆盖区的磷原子浓度，降低方阻<sup>[25]</sup>。

从图 5b 可以看出，实验组 2 的  $V_{oc}$  和  $I_{sc}$  均有明显提高，其中  $V_{oc}$  提高了  $3.8\text{ mV}$ ，这主要受益于 SE 结构的场效应钝化作用。 $I_{sc}$  提高了  $4.3\text{ mA}$ ，这是由于减少的发射极复合可以改善电池的短波光谱响应，从而提高电池的  $I_{sc}$ 。在此基础上，电池平均转换效率比基准组提高  $0.1\%$  左右。

## 3 结 论

研究了多晶 PERC 电池的背面和正面结构对电池性能的影响，结果显示背面钝化膜、背面激光开槽图形和正面选择性发射极等因素对多晶 PERC 电池的性能均有较大的影响。首先，在电池背面，通过采用三层  $\text{SiN}_x:\text{H}$  薄膜代替传统的双层  $\text{SiN}_x:\text{H}$  薄膜，能使更多的长波光光子被反射到硅衬底而被再次利用，成功地将  $I_{sc}$  提高了  $13\text{ mA}$ ，效率达到  $20.26\%$ ，绝对值较常规工艺提升  $0.07\%$ 。其次，通过优化电池背面的激光开窗工艺，在保持线宽、线距不变，仅改变实虚比，发现实虚比为  $34.4\%$  的激光开槽图形，能维持表面钝化和串联电阻之间的平衡，使得电池的  $V_{oc}$  和  $I_{sc}$  均表现出了优异的性能，效率较常规工艺提升  $0.11\%$ 。最后，在电池正面叠加选择性发射极后， $V_{oc}$  和  $I_{sc}$  均有提高，电池效率较常规工艺提升  $0.1\%$ 。若同时多晶 PERC 电池背面和正面叠加上三项工艺中的两项或三项一起叠加，预计还将进一步提高多晶 PERC 电池效率。

## 参考文献:

- [1] BLAKERS A W, WANG A H, MILNE A M, et al. 22.8% efficient silicon solar cell[J]. Applied physics letters, 1989, 55(13): 1363-1365. DOI: 10.1063/1.101596.
- [2] GREEN M A. The passivated emitter and rear cell (PERC): from conception to mass production[J]. Solar energy materials and solar cells, 2015, 143: 190-197. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.06.055.
- [3] DULLWEBER T, SCHMIDT J. Industrial silicon solar cells applying the passivated emitter and rear cell (PERC) concept-a review[J]. IEEE journal of photovoltaics, 2016, 6(5): 1366-1381. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2016.2571627.
- [4] HUANG H B, LV J, BAO Y M, et al. 20.8% industrial PERC solar cell: ALD  $\text{Al}_2\text{O}_3$  rear surface passivation, efficiency loss mechanisms analysis and roadmap to 24%[J]. Solar energy materials and solar cells, 2017, 161: 14-30. DOI: 10.1016/j.solmat.2016.11.018.
- [5] TO A, LI W M, LI X, et al. The effects of bifacial deposition of ALD  $\text{AlOx}$  on the contact properties of screen-printed contacts for p-type PERC solar cells[J].

- Energy procedia, 2017, 124: 914-921. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.291.
- [6] STRINITZ F, EL JAOUHARI A, SCHOERG F, et al. Advanced alkaline texturing and cleaning for PERC and SHJ solar cells[J]. Energy procedia, 2017, 130: 23-30. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.409.
- [7] HALLAM B, URUEÑA A, RUSSELL R, et al. Efficiency enhancement of i-PERC solar cells by implementation of a laser doped selective emitter[J]. Solar energy materials and solar cells, 2015, 134: 89-98. DOI: 10.1016/j.solmat.2014.11.028.
- [8] CHIU J S, ZHAO Y M, ZHANG S, et al. The role of laser ablated backside contact pattern in efficiency improvement of mono crystalline silicon PERC solar cells[J]. Solar energy, 2020, 196: 462-467. DOI: 10.1016/j.solener.2019.12.044.
- [9] SCHMIDT J, VEITH B, BRENDEL R. Effective surface passivation of crystalline silicon using ultrathin  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films and  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$  stacks[J]. Physica status solidi (RRL)-rapid research letters, 2009, 3(9): 287-289. DOI: 10.1002/pssr.200903272.
- [10] KERSTEN F, HEITMANN J, MÜLLER J W. Influence of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiN}_x$  passivation layers on LeTID[J]. Energy procedia, 2016, 92: 828-832. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.07.079.
- [11] 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 application, 2012, 20(3): 260-268. DOI: 10.1002/pip.2178.
- [12] 中国新能源网. 隆基 PERC 太阳能电池转换效率达到 24.06%[EB/OL]. (2019-01-18). <http://www.china-nengyuan.com/news/134487.html>.
- [13] FERTIG F, LANTZSCH R, MOHR A, et al. Mass production of p-type Cz silicon solar cells approaching average stable conversion efficiencies of 22%[J]. Energy procedia, 2017, 124: 338-345. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.308.
- [14] 光伏新闻. 突发! 隆基硅片再降 0.15 元/片, 30 天 3 降 [EB/OL]. <https://news.solarbe.com/202005/10/324693.html>.
- [15] HAMEIRI Z, BOROJEVIC N, MAI L, et al. Low-absorbing and thermally stable industrial silicon nitride films with very low surface recombination[J]. IEEE journal of photovoltaics, 2017, 7(4): 996-1003. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2017.2706424.
- [16] 贾河顺, 王明利, 任现坤, 等. 双层氮化硅薄膜对晶硅太阳能电池性能的影响[J]. 太阳能学报, 2014, 35(10): 2004-2008. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2014.10.029.
- [17] 孟庆蕾, 钱洪强, 陆红艳, 等. 背面氮化硅钝化膜厚度对单晶硅太阳能电池的影响[C]//第 12 届中国光伏大会暨国际光伏展览会(CPVC12)论文集. 北京: 中国可再生能源学会, 中科院, 2013: 1-4.
- [18] PICARD E, PIROT M, MONNA R, et al. Rear-surface laser contact opening design optimization for PERC solar cells[C]//Proceedings of the 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Amsterdam, the Netherlands, 2017: 641-645.
- [19] PLAGWITZ H, BRENDEL R. Analytical model for the diode saturation current of point-contacted solar cells[J]. Progress in photovoltaics: research and applications, 2006, 14(1): 1-12. DOI: 10.1002/pip.637.
- [20] KIM J, KIM J, LIM J-Y, et al. Laser ablation of aluminum oxide and silicon nitride rear-side passivation for i-PERC cell[J]. Renewable energy, 2015, 79: 135-139. DOI: 10.1016/j.renene.2014.09.018.
- [21] 庞恒强. 激光掺杂制作选择性发射极晶体硅 PERC 电池的工艺研究[J]. 材料导报, 2018, 32(S2): 21-29.
- [22] SHANMUGAM V, KHANNA A, BASU P K, et al. Impact of the phosphorus emitter doping profile on metal contact recombination of silicon wafer solar cells[J]. Solar energy materials and solar cells, 2016, 147: 171-176. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.12.006.
- [23] 宋帅迪, 赵广全, 杨冬琴, 等. 低损伤选择性发射极太阳能电池激光工艺[J]. 半导体技术, 2019, 44(11): 893-898. DOI: 10.13290/j.cnki.bdtjs.2019.11.012.
- [24] WU W L, ZHANG Z W, ZHENG F, et al. Efficiency enhancement of bifacial PERC solar cells with laser-doped selective emitter and double-screen-printed Al grid[J]. Progress in photovoltaics: research and applications, 2018, 26(9): 752-760. DOI: 10.1002/pip.3013.
- [25] 马红娜, 赵学玲, 张红妹. 激光掺杂制作选择性发射极电池扩散工艺的研究[J]. 光电子技术, 2016, 36(4): 270-273, 282. DOI: 10.19453/j.cnki.1005-488x.2016.04.012.

### 作者简介:

赵科巍 (1980-), 男, 硕士, 主要从事高效太阳能电池技术研发。

沈文忠 (1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光伏科学与技术。