



# PERC 太阳电池 发射极表面优化设计与模拟

湖南红太阳光电科技有限公司 ■ 刘文峰\* 周子游 黄海龙 赵增超

**摘 要：**通过模型计算，分析了发射极表面对 PERC 太阳电池转换效率的影响；然后设计了不同条件下的扩散和热氧化工艺实验，得到了最高转换效率达 22.30% 的 PERC 太阳电池；并对实验结果进行拟合，优化后的扩散和热氧化工艺降低了发射极表面复合速率，提高了电池的转换效率。  
**关键词：**PERC；太阳电池；表面复合速率；转换效率；优化设计；发射极

## 0 引言

随着化石能源日益枯竭，环境问题日益凸显，可再生能源越来越受到人们的关注。晶硅太阳电池是可再生能源的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>，也是目前产业化最广的太阳电池。工业型钝化发射极背面接触电池 (passivated emitter and rear cell, PERC)<sup>[3]</sup>是在常规铝背场晶硅太阳电池的基础上增加了背面钝化叠层  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x\text{H}_y$  与激光开膜工艺，增加这两道工序后的 PERC 单晶硅太阳电池比常规铝背场单晶硅太阳电池的绝对转换效率提高了 1.0~1.2%<sup>[4-6]</sup>。PERC 太阳电池作为一种高效太阳电池，成为近年来备受市场青睐的佼佼者。

与常规铝背场晶硅太阳电池不同的是，PERC 太阳电池对发射极表面的要求非常高。有研究表明，扩散时工艺气体的比例<sup>[7]</sup>、表面掺杂浓度<sup>[8]</sup>，以及扩散后表面方阻的均匀性<sup>[9]</sup>都会影响发射极表面的质量。国内有研究通过 PC1D

和 PC2D 软件来模拟优化 PERC 太阳电池，并得到了最优钝化条件和激光开膜参数<sup>[10-11]</sup>。本文通过 PC2D 软件模拟分析了发射极表面复合速率对 PERC 太阳电池的影响，并利用工业生产型设备进行实验，通过调整扩散和热氧化工艺，得到优化后的 PERC 太阳电池，并对结果进行拟合。

## 1 数值模拟

### 1.1 PC2D 软件及原理介绍

PC2D<sup>[12]</sup>于 2011 年由美国 Hanwha Solar 公司发布，是一款采用有限元方法进行网格剖分，用于晶硅太阳电池模拟研究的软件。PC2D 软件将器件模拟区域设定为准中性，把任意大小的区域分成  $20 \times 20$  个大小相同的矩形格子，并对每个格子进行单独定义。电子与空穴的漂移-扩散方程主要由电子、空穴准费米电势和静电势来表示，通过热电压  $V_t$  归一化后，

收稿日期：2019-04-24

基金项目：湖南省创新创业技术投资项目：高效太阳能电池关键装备国产化及其集成应用 (2017GK5002)

通信作者：刘文峰 (1983—)，男，硕士、高级工程师，主要从事光伏材料与器件方面的研究。liuwf@cs48.com

每个格子的 4 个顶点处的静电势值就是该点电子和空穴准费米电势的函数。

1.2 模拟的 PERC 太阳电池的器件结构及参数设置

模拟区域如图 1 中的虚线部分所示，其中， $w_f$  为栅线宽度， $w_b$  为背面开膜宽度，激光开膜间距  $l$  为正面栅线间距  $L$  的 50%，使整个 PERC 太阳电池成为对称结构。

模拟的 PERC 太阳电池的主要参数如表 1 所示。

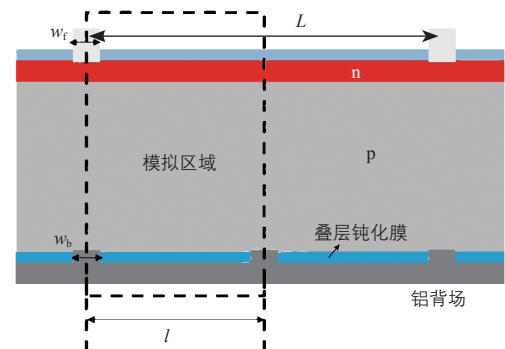


图 1 模拟区域的结构示意图

表 1 模拟的 PERC 太阳电池的主要参数

电池结构	参数设置
基区 (p 区)	厚度 $D=170\text{ }\mu\text{m}$ ，硼浓度 $N=10^{16}\text{ cm}^{-3}$ ，少数寿命 $\tau=250\text{ }\mu\text{s}$
掺杂区 (n 区)	栅线区域方阻 $R_1=85\text{ }\Omega/\square$ ，结深 $d_{n1}=0.4\text{ }\mu\text{m}$ ，表面复合速率 $S_1=2\times 10^3\text{ cm/s}$ ； 光照区域方阻 $R_2=130\text{ }\Omega/\square$ ，结深 $d_{n2}=0.3\text{ }\mu\text{m}$ ，表面复合速率 $S_2=650\text{ cm/s}$
栅线	横向数目 $n_1=102$ ，宽度 $w_{f1}=28\text{ }\mu\text{m}$ ；主栅数目 $n_2=5$ ，宽度 $w_s=750\text{ }\mu\text{m}$ ； 栅线间距 $L=1.6\text{ mm}$ ；表面复合速率 $S_3=6\times 10^5\text{ cm/s}$ ；主栅镂空部分宽度 $w_v=550\text{ }\mu\text{m}$ ， 长度 $a=11.45\text{ mm}$ ，七段式主栅；激光开膜间距 $l=0.8\text{ mm}$ ，宽度 $w_b=40\text{ }\mu\text{m}$
减反射层	折射率 $\alpha=2.05$ ，厚度 $T_h=80\text{ nm}$
电路部分	外部串联电阻 $R_{s\text{Add}}=0.3\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ ，外部并联电导 $G_{sh\text{Add}}=0$ (忽略漏电，取外部并联电阻无穷大)
背接触区	方阻 $R_3=85\text{ }\Omega/\square$ ，背高低结深 $H_R=3.6\text{ }\mu\text{m}$ ，表面复合速率 $S_4=10^4\text{ cm/s}$
背钝化区	表面复合速率 $S_5=10\text{ cm/s}$

1.3 模拟结果与分析

通过上述模型参数分别计算了发射极表面复合速率、硅片少数寿命、表面掺杂浓度和结深对 PERC 太阳电池转换效率的影响，模拟结果如图 2、图 3 所示。

由图 2 可知，结深随着表面掺杂浓度的增加逐渐变浅；并且随着表面掺杂浓度的提高，

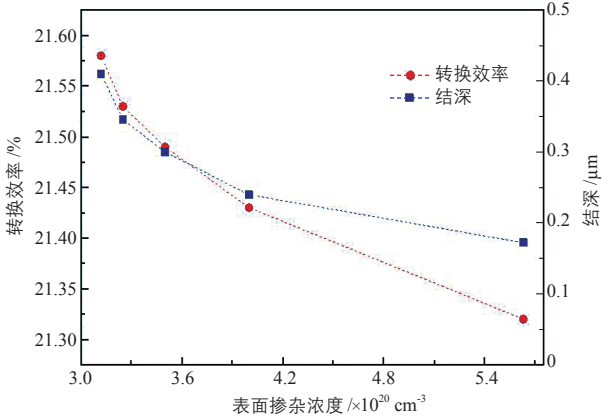


图 2 表面掺杂浓度、结深与电池转换效率三者之间的关系

表面复合速率增强，复合电流变大，导致电池转换效率降低。当表面掺杂浓度为  $3.12\times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$  时，表面饱和电流  $J_0$  为  $22\text{ fA/cm}^2$ ，此时电池的转换效率达到了 21.58%；当表面掺杂浓度增加到  $5.63\times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$  时，表面饱和电流  $J_0$  为  $39\text{ fA/cm}^2$ ，饱和电流增加明显，此时电池的转换效率降至了 21.32%。这说明对于片源质量较好的硅

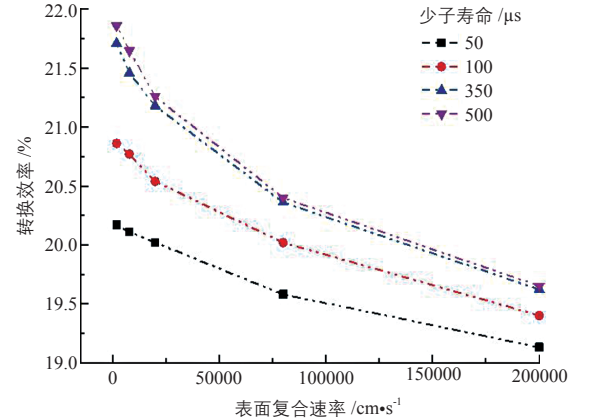


图 3 表面复合速率、少数寿命与转换效率三者之间的关系



片 ( 少子寿命 $\geq 500\ \mu\text{s}$ ), 表面掺杂浓度越低, 结深越深, 制成的太阳电池的转换效率越高。

由图 3 可知, 当少子寿命低于  $350\ \mu\text{s}$  时, 少子寿命的增加对电池转换效率的影响较大; 当少子寿命超过  $350\ \mu\text{s}$  时, 少子寿命的增加对电池转换效率的影响变小。当少子寿命为  $500\ \mu\text{s}$ 、表面复合速率为  $20000\ \text{cm/s}$  时, 电池的转换效率达到最高, 为  $21.86\%$ 。随着表面复合速率的增加, 电池转换效率迅速下降, 并且少子寿命越高, 下降速率越快。也就是说, 硅片的少子寿命越高, 表面复合速率对电池转换效率的影响越强。利用热氧化技术<sup>[13]</sup>可在硅片表面生长二氧化硅层, 能够有效钝化表面悬挂键, 从而降低表面复合速率, 提高太阳电池的转换效率。

通过以上分析可以发现, 发射极表面复合速率对 PERC 太阳电池的转换效率影响显著, 并且较低的表面掺杂浓度及厚度适中、均匀性较好的氧化钝化层, 可有效抑制表面复合速率, 提高短波利用率, 减小发射极复合电流, 有利于 PERC 太阳电池转换效率的提高。

## 2 实验材料和方法

本文设计了不同的扩散、热氧化实验, 以期通过调整扩散和热氧化工艺, 得到更高的 PERC 太阳电池转换效率。

### 2.1 实验样品

实验样品选用西安隆基硅材料股份有限公司生产的 M2 掺硼单晶硅片, 具体参数如表 2 所示。

表 2 实验硅片的性能参数

参数	内容
尺寸 /mm	156×156
导电类型	p 型
掺杂元素	硼
中心厚度 / $\mu\text{m}$	180
替位碳含量 / $\text{at}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\leq 5\times 10^{16}$
位错密度 / $\text{cm}^{-2}$	$\leq 500$
电阻率范围 / $\Omega\cdot\text{cm}$	0.5 ~ 1.0
少子寿命 / $\mu\text{s}$	$\geq 20$

### 2.2 实验设备和测试仪器

实验涉及到的设备信息如表 3 所示。

表 3 实验所用设备信息

设备名称	公司名称
InTex 型制绒设备	德国 Rena
M5111-9 型低压扩散炉设备	中国电子科技集团公司第 48 研究所
InOxSide 型二次清洗设备	德国 Rena
DR-SE-DY80 型激光选择性掺杂设备	武汉帝尔激光科技有限公司
M5111-6WKUM 型氧化炉	湖南红太阳光电科技有限公司
M82200-10UM 型 PECVD 设备	湖南红太阳光电科技有限公司
MAiA 6.1 型 PECVD 镀膜设备	瑞士 Meyer Burger
MX-FDL-PERC 型激光开膜设备	苏州迈为科技股份有限公司
SDL-SP 型丝网烧结设备	苏州迈为科技股份有限公司

测试仪器主要包括: ECV-CVP21 型结深测试仪 (德国 WEP)、WCT-120 少子寿命测试仪 (美国 Sinton)。

电性能测试软件: Halm 电性能测试软件 (德国 HALM)。电性能标准测试条件为太阳辐照度  $1000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、光谱 AM1.5、电池温度  $25\pm 1\ ^\circ\text{C}$ 。

### 2.3 实验流程及方案

实验所用硅片均在相同量产型工业设备上, 进行制绒、扩散、刻蚀、激光选择性掺杂、热氧化、镀膜、激光开膜、丝网印刷、烧结等一系列电池制备流程, 制备完成的电池由 Halm 电性能测试软件进行电性能测试。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 不同扩散工艺对电池电性能的影响

取 600 片相同的实验硅片, 经过制绒后, 分成 A、B、C 3 组, 每组 200 片, 分别对应 3 组不同的扩散工艺; 磷扩散工艺的压强为  $125\ \text{mbar}$ , 温度参数如图 4 所示。实验中, 每组样品均使用

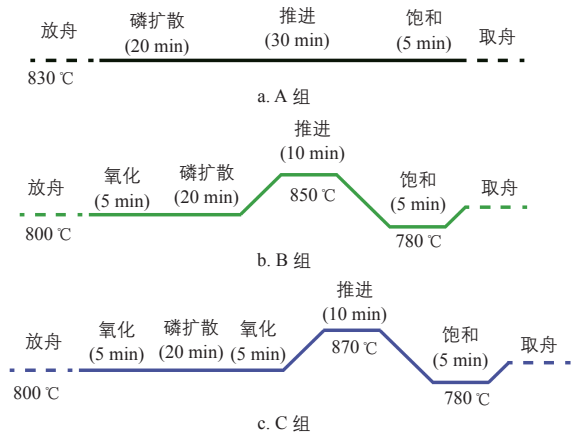


图 4 3 组硅片的不同扩散工艺示意图

同一扩散炉管和石英载舟。

A 组的扩散工艺为恒温扩散，扩散温度保持在 830 °C；B 组为变温扩散，在 800 °C 氧化 5 min 后再进行磷扩散，然后升温至 850 °C 进行推进；C 组仍为变温扩散，是在 B 组的基础上，在磷扩散步骤后又增加了 5 min 的氧化步骤，然后升温至 870 °C 进行推进。工艺中的饱和步骤能起到修复缺陷和吸杂的作用。

ECV 测试仪可以较为精确地测量出硅片纵向深度的活性磷原子浓度。为排除设备对实验数据的影响，在对 A、B、C 3 组实验硅片进行不同扩散工艺后，取每组石英载舟同一位置的硅片，使用 ECV 测试仪分别测试 3 组实验硅片的表面掺杂浓度，结果如图 5 所示。

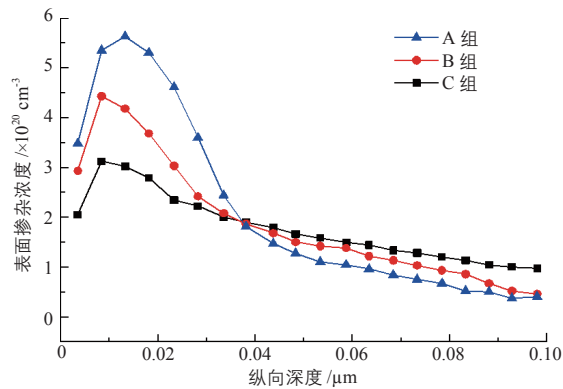


图 5 扩散工艺后硅片纵向深度 ECV 测试数据曲线

由图 5 可知，在不同扩散工艺后，A、B、C 3 组实验硅片的最大表面掺杂浓度分别为  $5.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、 $4.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、 $3.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。其中，C 组硅片的最大表面掺杂浓度最低，并且其纵向深度

小于 0.10  $\mu\text{m}$  时，表面掺杂浓度下降较为缓慢，说明其形成了良好的 p-n 结。这是由于在推进前通氧会在硅片表面形成一层氧化硅薄膜，阻挡磷原子的扩散，氧化硅薄膜越厚，阻挡效果就越明显。

降低表面掺杂浓度、提高表面钝化可有效降低发射极表面复合速率<sup>[14]</sup>，从而提高 PERC 太阳电池的转换效率。但载流子需要横向传输并被电极收集，若表面掺杂浓度太低，会使少子迁移率受到影响，因此，在降低表面掺杂浓度时，必须保证合适的少子迁移率。经过扩散工序后，硅片的方块电阻可以良好地反映硅片表面调整载流子迁移率后的效果。同时，载流子迁移率将直接影响电池的填充因子。

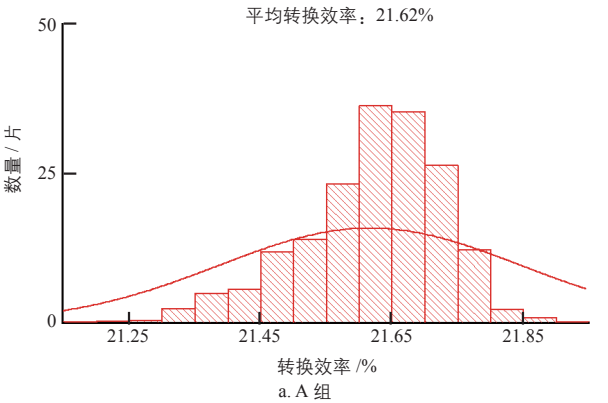
为保证实验数据的可靠性，3 组实验硅片经过扩散工艺后，进行后续的刻蚀、常压热氧化、背面沉积氧化铝膜、正面沉积氮化硅膜、背面激光开膜、丝网印刷、烧结时的工艺条件、设备、分选测试条件均相同。

表 4 为采用不同扩散工艺制备的 3 组太阳电池的电性能参数，图 6 为 3 组太阳电池的转换效率分布图。

表 4 采用不同扩散工艺制备的 3 组太阳电池的电性能参数

类型	开路电压 /mV	短路电流 /A	填充因子 /%	$Suns-V_{oc}$ /mV	平均转换效率 /%
A 组	665	9.71	81.8	628	21.62
B 组	671	9.72	81.7	634	21.81
C 组	671	9.75	81.7	636	21.85

注：表中  $Suns-V_{oc}$  为准开路电压，即忽略串、并联电阻后测得的开路电压





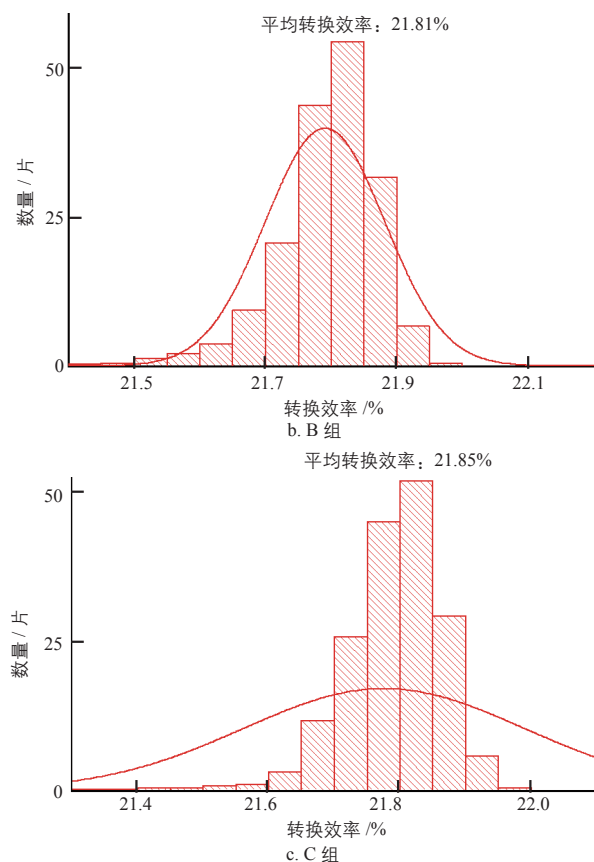
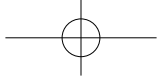


图 6 3 组太阳能电池的转换效率分布图

结合表 4 和图 6 可知,相较于 B 组和 C 组, A 组电池的开路电压和短路电流较低; C 组电池的平均转换效率最高,且其开路电压和短路电流也较高。这是因为 C 组的活性磷原子表面掺杂浓度最低,抑制了表面的俄歇复合,并且增加了短

波响应。相比 A 组电池 21.62% 的平均转换效率, C 组电池的平均转换效率达到了 21.85%, 绝对效率提高了 0.23%, 这与图 2 的模拟结果相一致。

### 3.2 不同热氧化工艺对电池电性能的影响

在硅片正面通过热氧化的方式生长一层二氧化硅可有效钝化硅片表面的悬挂键<sup>[15]</sup>, 达到降低表面复合速率的目的。图 7 为热氧化工艺参数示意图, 从放舟到取舟共计 40 min。

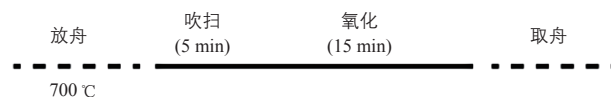


图 7 热氧化工艺参数示意图

取 1200 片相同的实验硅片, 经过制绒、C 组扩散工艺进行扩散、二次刻蚀、激光选择性掺杂后, 分成 D、E、F、G、H、I 共 6 组样品, 每组 200 片。热氧化设备为湖南红太阳光电科技有限公司的五管氧化炉, 温度参数如图 7 所示。调整 6 组硅片的热氧化工艺, D 组为不经过热氧化处理, 仅在氧化炉中放置 40 min; E 组为常压热氧化, 压强为 1000 mbar; F、G、H、I 皆为低压热氧化, 压强分别为 600、400、200、50 mbar。为保证实验数据的可靠性, 每组实验中均使用同一热氧化炉管和石英载舟, 且后续制备电池流程中的工艺条件、设备和测试条件均相同。表 5 为采用不同氧化工艺制备的 6 组太阳能电池的电性能参数。

表 5 采用不同氧化工艺制备的 6 组太阳能电池的电性能参数

类型	压强 /mbar	开路电压 /mV	短路电流 /A	填充因子 /%	$Suns-V_{oc}/mV$	平均转换效率 /%
D 组	—	665	9.72	81.8	626	21.62
E 组	1000	671	9.75	81.6	636	21.84
F 组	600	673	9.77	81.6	637	21.92
G 组	400	673	9.77	81.7	639	21.97
H 组	200	675	9.77	81.7	643	22.04
I 组	50	665	9.73	81.8	629	21.62

由表 5 可知, 相比未经过热氧化处理的 D 组电池的开路电压, 经过常压热氧化处理后的 E 组电池的开路电压提高了 6 mV, 短路电流提高了 30 mA, 填充因子降低了 0.2%, 平均转换效率提升了 0.22%。这是因为二氧化硅的表面钝化

作用降低了发射极表面复合速率, 提高了开路电压和短路电流。在高温热氧化过程中, 硅片的方块电阻上升了 3~5  $\Omega/\square$ , 导致制备的电池的填充因子有所降低。在实验中, 随着热氧化工艺压强降至 200 mbar, 开路电压不断增大; 热氧化工

艺时压强为 200 mbar 的 H 组电池的平均转换效率最高, 达到了 22.04%, 相比未进行热氧化处理的 D 组电池的平均转换效率提高了 0.42%。这是由于氧化炉内氧气分子平均间距相近, 低压环境有利于杂质气体逃逸造成的。压强降低, 氧气分子平均自由程越大, 形成的二氧化硅层越均匀, 有利于提高电池的转换效率。

氧气分子平均自由程  $\bar{\lambda}$  的计算式为:

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p} \quad (1)$$

式中,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ , 取  $1.38\times 10^{-23}$ ;  $T$  为环境温度,  $\text{K}$ ;  $d$  为氧气分子有效直径,  $\text{m}$ , 取  $3.46\times 10^{-10}$ ;  $p$  为压强,  $\text{Pa}$ 。

氧气分子平均间距  $\delta$  的计算式为:

$$\delta = \left(\frac{p}{RT}\right)^{-\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中,  $R$  为气体常数,  $\text{mbar}\cdot\text{m}^3/(\text{mol}\cdot\text{K})$ , 取  $8.314\times 10^{-2}$ 。

根据式 (1)、式 (2) 计算出不同压强下的氧气分子平均自由程与分子平均间距, 如表 6 所示。

表 6 不同压强下氧气分子平均自由程与分子平均间距

压强 /mbar	平均自由程 $\bar{\lambda}/\times 10^{-7} \text{ m}$	分子平均间距 $\delta/\times 10^{-9} \text{ m}$
1000	2.27	5.0
600	3.78	5.9
400	5.68	6.8
200	11.40	8.5
50	45.40	13.0

由表 6 可知, 在压强从 1000 mbar 降至 50 mbar 的过程中, 氧气分子平均自由程均远大于分子平均间距, 且分子平均间距在压强大于 200 mbar 时相互之间的变化不明显。这是因为压强会影响氧化硅层的均匀生长, 压强降低在提高氧气分子平均自由程的同时, 也会使吸附在硅片表面的杂质气体的逃逸机率相应增加, 而表面杂质气体的逃逸, 提高了硅片表面的钝化效果<sup>[16]</sup>, 结合表 5 可以发现, 在压强为 200 mbar 时, H

组电池的平均转换效率达到了 22.04%; 而压强降至 50 mbar 时二氧化硅的生长速率变慢, 导致氧化硅层过薄, 无法起到良好的钝化效果<sup>[17]</sup>, 因此, I 组电池的转换效率降低, 这与模拟结果一致。

图 8 为 H 组电池的转换效率分布图, 可以看出其最高转换效率为 22.30%。图 9 为最高转换效率为 22.30% 时的  $I$ - $V$  曲线图。

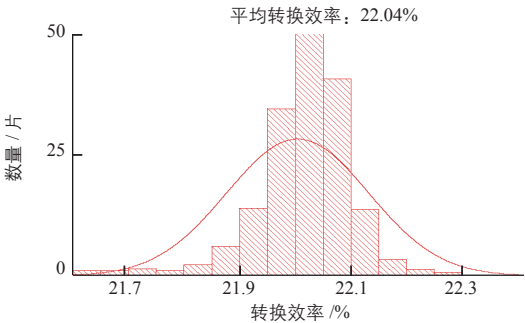


图 8 H 组电池转换效率分布图

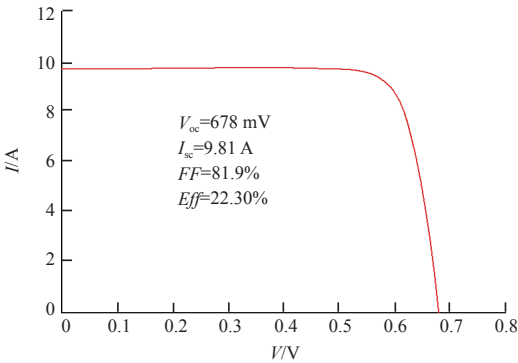
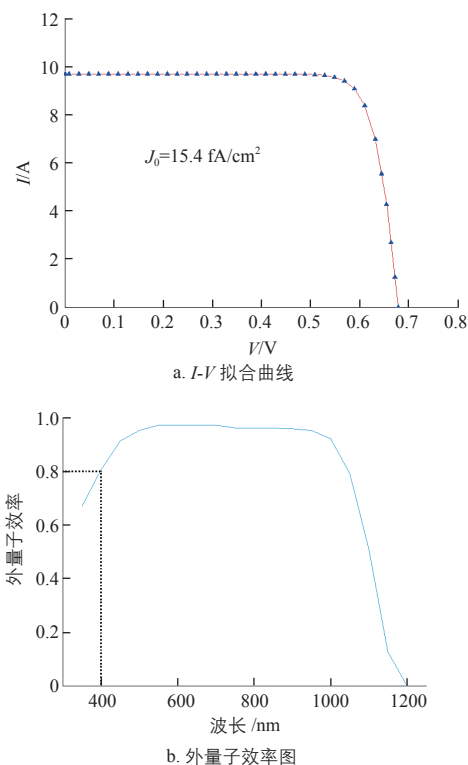
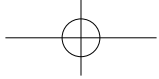


图 9 H 组电池最高转换效率时的  $I$ - $V$  曲线图

为了进一步研究影响 PERC 太阳能电池电性能的关键因素, 对实验中最高转换效率为 22.30% 的电池的  $I$ - $V$  曲线进行拟合, 如图 10a 所示, 通过拟合计算出电池表面饱和电流  $J_0=15.4 \text{ fA}/\text{cm}^2$ , 其与表面掺杂浓度为  $3.12\times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、表面饱和电流为  $22 \text{ fA}/\text{cm}^2$  时相比, 表面饱和电流明显降低, 这说明通过改变扩散和热氧化工艺, 有效地抑制了表面复合速率, 形成了良好的发射极表面。

图 10b 为最高转换效率为 22.30% 的电池的外量子效率曲线图。由图可知, 电池在短波区域的响应高达 70%~80%, 这说明扩散和热氧化工艺改进后有效地抑制了表面复合速率, 提高了短波利用率, 使得电池转换效率提升明显。

图 10 最高转换效率时电池的  $I$ - $V$  拟合曲线和外量子效率图

#### 4 结论

本文使用 PC2D 软件对 PERC 太阳电池进行了模拟分析, 研究发射极表面掺杂浓度、少子寿命、表面复合速率对 PERC 太阳电池转换效率的影响, 证明了较低的表面掺杂浓度和厚度适中、均匀性好的钝化膜可有效降低表面饱和电流, 抑制 PERC 太阳电池发射极表面复合速率; 并利用工业生产型设备进行实验, 通过调整扩散和热氧化工艺, 得到优化后的 PERC 电池最高转换效率达到 22.30%, 平均转换效率达到 22.04%。对实验优化后的电池进行了拟合, 优化后的扩散和热氧化工艺使电池表面饱和电流  $J_0$  降至 15.4 fA/cm<sup>2</sup>, 降低了发射极表面复合速率。由此可知, 发射极的复合速率是制约 PERC 太阳电池转换效率提升的关键因素。

#### 参考文献

[1] Green M A. The path to 25% silicon solar cell efficiency: history of silicon cell evolution[J]. Progress in Photovoltaics:

Research and Applications, 2009, 17(3): 183 – 189.

[2] Yoshikawa K, Kawasaki H, Yoshida W, et al. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%[J]. Nature Energy, 2017, 2(5): 17032.

[3] Blakers A W, Wang A, Milne A M, et al. 22.8% efficient silicon solar cell[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55(13): 1363 – 1365.

[4] Huang H, Lv J, Bao Y, et al. 20.8% industrial PERC solar cell: ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rear surface passivation, efficiency loss mechanisms analysis and roadmap to 24%[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 161: 14 – 30.

[5] Richter A, Benick J, Hermle M. Boron Emitter Passivation With Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiN<sub>x</sub> Stacks Using ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2013, 3(1): 236 – 245.

[6] Huang H, Lv J, Bao Y, et al. 20.8% industrial PERC solar cell: ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rear surface passivation, efficiency loss mechanisms analysis and roadmap to 24%[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 161: 14 – 30.

[7] Li H, Kim K, Hallam B, et al. POCl<sub>3</sub> diffusion for industrial Si solar cell emitter formation[J]. Frontiers in Energy, 2017, 11(1): 42 – 51.

[8] Suh D. Efficient implementation of multiple drive-in steps in thermal diffusion of phosphorus for PERC solar cells[J]. Current Applied Physics, 2018, 18, (2): 178 – 182.

[9] Tahir S, Ali A, Amin N, et al. The Effect of Nonuniform Emitter Sheet Resistance on PERC Solar Cell Performance[J]. Silicon, 2018, (1): 1 – 7.

[10] 李宁, 谷书辉, 任丙彦. PERC 电池背表面钝化的 PC1D 仿真分析[J]. 太阳能学报, 2018, 39(8): 2273 – 2278.

[11] 白焱辉. PERC 太阳电池的工艺研究与器件模拟[D]. 广州: 中山大学, 2015.

[12] Basore P A, Cabanas-Holmen K. PC2D: A circular-reference spreadsheet solar cell device simulator[A]. 37th Photovoltaic Specialists Conference[C]. Seattle, Washington, USA, 2011.

[13] Glunz S W, Feldmann F. SiO<sub>2</sub> surface passivation layers – a key technology for silicon solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 185: 260 – 269.

[14] Lin D, Abbott M, Lu D, et al. Process optimization of localized BSF formation for solar cells with over 20% energy conversion efficiency[A]. 40th Photovoltaic Specialist Conference[C]. Denver, USA, 2014.

[15] Bonilla R S, Hoex B, Hamer P, et al. Dielectric surface passivation for silicon solar cells: A review[J]. Applications and Materials, 2017, 214(7): 1700293.

[16] Lee J Y. Rapid Thermal Processing of Silicon Solar Cells: Passivation and Diffusion[EB/OL]. [https://www.researchgate.net/publication/29756362\\_Rapid\\_thermal\\_processing\\_of\\_silicon\\_solar\\_cells-passivation\\_and\\_diffusion](https://www.researchgate.net/publication/29756362_Rapid_thermal_processing_of_silicon_solar_cells-passivation_and_diffusion), 2003.

[17] Muhlbauer M, Piechulla A, Voyer C, et al. Industrial low-pressure phosphorus diffusion for high performance and excellent uniformity[A]. 26th European International Conference on Photovoltaic Solar Energy[C]. Hamburg, Germany, 2011. 太阳能