

Study on Lowering the Series Resistance of Local Contact Cell with Screen Printing Method

Yehua Tang¹, Meng Wang^{2*}, Chengjun Shi¹, Xinlin Chen¹, Zhiwei Han³, Jianming Fei¹

¹Eoply New Energy Technology Co., Ltd., Hai'an County Jiangsu

²Jiatai Engineering & Technology Co., Ltd., Nantong Jiangsu

³Nantong EOPLY New Energy Power Engineering CO., Ltd., Nantong Jiangsu

Email: yehua.tang@eoply.com, *asianwangmeng@163.com

Received: May 12th, 2018; accepted: May 26th, 2018; published: Jun. 7th, 2018

Abstract

Aluminum back surface field (Al-BSF) and local contact cells (LCC) are obtained by screen printing method. The conversion efficiency (η) of Al-BSF solar cells is 17.44%. The conversion efficiency of LCC is only 8.95% because of the poor series resistance (R_s) which is eight times higher than that of Al-BSF. The series resistance is measured under two different incident power of 1000 W/m² and 500 W/m² at 25°C, AM1.5. The results of this paper show that the series resistance decreases with Aluminum (Al) dopant. It reaches the minimum when the Al content is in the vicinity of 60%. It decreases by 11 m Ω . And the conversion efficiency rises 2.59%. Although the open circuit voltage (V_{oc}) is still improved, both the series resistance and the conversion efficiency degrade with Al increasing if Al content is higher than 60%.

Keywords

Local Contact, Series Resistance, Screen Printing, Conversion Efficiency

丝网印刷局域背电极接触低串联电阻研究

汤叶华¹, 王孟^{2*}, 施成军¹, 陈新林¹, 韩志伟³, 费建明¹

¹欧贝黎新能源科技股份有限公司, 江苏 海安县

²嘉泰工程技术有限公司, 江苏 南通

³南通欧贝黎新能源电力工程有限公司, 江苏 南通

Email: yehua.tang@eoply.com, *asianwangmeng@163.com

收稿日期: 2018年5月12日; 录用日期: 2018年5月26日; 发布日期: 2018年6月7日

*通讯作者。

摘要

该文采用丝网印刷方式制备常规铝背场(AI-BSF)太阳电池及局域背电极接触太阳电池(LCC), 转换效率(η)分别为17.44%和8.95%。LCC串联电阻(R_s)为21.34 m Ω , 是转换效率低的主要原因。该文在1000 W/m²及500 W/m²光照条件下, 以双曲线法监测LCC的串联电阻, 研究铝(AI)掺杂对转换效率的影响。随着AI掺杂量逐渐增加串联电阻逐渐减小, 当AI掺杂量达60%时, 串联电阻达到最小, 比掺杂前降低11 m Ω , 转换效率提升2.59% (abs.)。随AI掺杂量不断增加, 开路电压(V_{oc})持续提高, 但掺杂量过高(>60%)会造成串联电阻增加, 降低转换效率。

关键词

局域接触, 串联电阻, 丝网印刷, 转换效率

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

背面钝化、背面金属局域接触以减少背面复合是提升太阳电池转换效率(η)的必要途径。PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) 电池[1]是一种背面采用介质膜钝化, 背面金属电极与硅衬底(Si)之间进行局域接触的电池结构, 相较常规(AI-BSF)太阳电池有如下优点: 1) 钝化介质膜介于金属和 p 型硅(p-Si)之间避免两者直接接触, 降低表面复合速率; 2) 有效地避免电池片翘曲, 减少破损和降低成本; 3) 介质膜具有背反射作用, 光子在背表面反射回前表面过程中还有一次被吸收的机会, 使在硅能隙附近波长部分的内量子效率增加。通过背面钝化, 电极局域接触, 转换效率可提高 0.5%以上[2]。

激光是对背面介质膜开口实现局域电极接触制备 PERC 太阳电池的主要手段, 有两种实现方式, 一是烧蚀介质膜[3], 二是激光烧结接触(LFC) [2]。但是激光过程会损伤硅基体, 不利于太阳电池转换效率提升。光刻是制备 PERC 的另一途径, 但不论是光刻还是激光技术, 相对于产业化丝网印刷技术来说, 都需要新增价格高昂的设备, 且工序繁复, 控制要求高。

为便于产业化应用及成本控制, 该文以成本低廉、技术成熟的丝网印刷方式作为研究、制备背面局域接触电极及电池的技术手段, 监测分析串联电阻(R_s), 并研究降低串联电阻的途径和方向。需要指出的是, 除了电极局域接触外, 背面抛光、背面钝化介质膜、背面局域电极接触区域尺寸和间距等参数均是影响 PERC 太阳电池性能的重要变量, 但该文主要目的是研究降低丝网印刷制备局域背电极接触电池串联电阻的途径和方法, 对背表面状态及钝化介质膜未作优化, 钝化介质膜选用常规钝化减反射氮化硅(SiN_x)膜。为与背表面有良好抛光及钝化的 PERC 太阳电池相区别, 该文中将未经良好钝化的背钝化电极局域接触太阳电池简称为 LCC (Local Contact Cell)。

2. 研究方式

串联电阻对太阳电池的输出特性有重要意义, 监测串联电阻对太阳电池结构、工艺的设计、控制和优化具有重要意义, 光照条件下晶体硅太阳电池串联电阻测试方式有单曲线法和双曲线法。

1) 单曲线法测试串联电阻

晶体硅太阳能电池可用单二极管直流模式[4]表示, 如式(1)所示:

$$I = I_L - I_D \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中, q ——电子电荷; k ——玻尔兹曼常数; T ——绝对温度; R_{sh} ——并联电阻; R_s ——串联电阻; n ——太阳能电池二极管品质因子; I_D ——太阳能电池反向漏电流; I_L ——光生电流。

由式(1), 在忽略高阶无穷小条件下, 太阳能电池并联电阻及串联电阻分别为太阳能电池电流(I)-电压(V)曲线上当 $V \rightarrow 0$ 及 $I \rightarrow 0$ 处的斜率[5], 如式(2)所示:

$$\begin{cases} R_{sh} = \left| \frac{dI}{dV} \right|^{-1} \Big|_{V=0} \\ R_s = \left| \frac{dI}{dV} \right|^{-1} \Big|_{I=0} \end{cases} \quad (2)$$

因而, 并联电阻越大、串联电阻越小, 太阳能电池 I - V 曲线越接近矩形, 则填充因子(FF)越大, 其他参数不变的情况下越有利于提高转换效率。由此, 并联电阻、串联电阻是影响填充因子和最大输出功率(P_m)的直接因素[6], 所谓单曲线法就是在标准条件(AM1.5, 25°C、1000 W/m²)下测试太阳能电池 I - V 曲线, 根据式(2)可得串联电阻。

2) 不同辐照强度双曲线法测试串联电阻

标准条件下测试太阳能电池短路电流(I_{sc})、开路电压(V_{oc})及 I - V 曲线, 曲线上最大功率点(P_m)电流、电压为 I_m 、 V_m ; 在光强 E (AM1.5, 25°C, 入射功率 $P_{in} < 1000$ W/m²)下测得短路电流及开路电压 $I_{sc,E}$ 、 $V_{oc,E}$, 测试曲线上某一点(I_E 、 V_E)处太阳能电池 pn 结的电流与标准光强下最高输出点处的结电流相等, 则两状态下太阳能电池的结电压亦相同[7], 如式(3)所示:

$$I_{sc,E}R_s + V_{oc,E} = I_{sc,E}R_s + V_m \quad (3)$$

忽略光电导对串联电阻的影响, 由式(3)得:

$$R_s = \frac{V_m - V_{sc,E}}{I_m - I_{sc,E}} \quad (4)$$

不同辐照强度双曲线法的测试结果表征了太阳能电池在最佳工作点 P_m 附近时的串联电阻, 对于太阳能电池转换效率(η)及填充因子(FF)的衡量至关重要, 如式(5)、(6)所示为转换效率及填充因子定义表达式:

$$\eta = \frac{P_m}{AP_{in}} \quad (5)$$

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc}V_{oc}} \quad (6)$$

其中 A 为太阳能电池面积, 所以该文采用德国 Berger 测试仪分别在标准测试条件及 500 W/m² 光照入射功率下测试 LCC 的输出参数及 I - V 曲线, 选取满足条件的点, 由式(4)求解得串联电阻。

3. 实验及结果讨论

3.1. 实验流程

以 156 mm × 156 mm 的 p 型多晶硅(mc, p-Si)为衬底, 电阻率约为 1.5 Ω·cm。首先进行表面清洗, 使前表面结构形成具有减反射效果的结构, 烘干后高温磷扩散使前表面薄层反型形成发射极区(n-Si), 扩

散层方块电阻平均为 $85 \Omega/\square$ ，二次清洗去除表面的磷硅玻璃并去边，烘干后在前表面用等离子增强化学气相沉积(PECVD)法沉积氮化硅(SiN_x)膜(膜厚约 80 nm ，折射率约 2.18)。然后分成两组，如图 1 所示，一组是 Al-BSF 太阳能电池，为参考组；另一组是 LCC，在背表面采用 PECVD 沉积 SiN_x 膜后丝网印刷银(Ag)，烘干后在背表面丝网印刷 Ag 并烧结，完成 LCC 制备。用德国 Berger 测试仪测试两组太阳能电池片在标准条件下的输出参数开路电压(V_{oc})、短路电流(I_{sc})、填充因子(FF)及转换效率(η)，分析串联电阻(R_s)。

3.2. 结果及讨论

Al-BSF 太阳能电池及 LCC 标准测试条件下输出参数统计平均值如表 1 所示，Al-BSF 太阳能电池转换效率为 17.44% ，由于串联电阻过大，LCC 的转换效率为 8.95% ，Al-BSF 太阳能电池串联电阻平均为 $2.74 \text{ m}\Omega$ ，LCC 串联电阻为 $21.34 \text{ m}\Omega$ ，是 Al-BSF 太阳能电池的 8 倍。串联电阻过高，不仅造成 LCC 的短路电流过小，为 7.792 A ，而且会降低 LCC 的填充因子，仅为 48.20% ，比 Al-BSF 太阳能电池相对降低 38.68% ，LCC 实现的转换效率仅为 Al-BSF 太阳能电池的 51.32% 。从表中可以看出，LCC 的开路电压为 579.7 mV ，比 Al-BSF 低 44.9 mV (相对低 7.19%)，其中 LCC 背面未进行良好抛光是原因之一，背面用 SiN_x 做钝化介质膜无法取得良好钝化效果是原因之二。

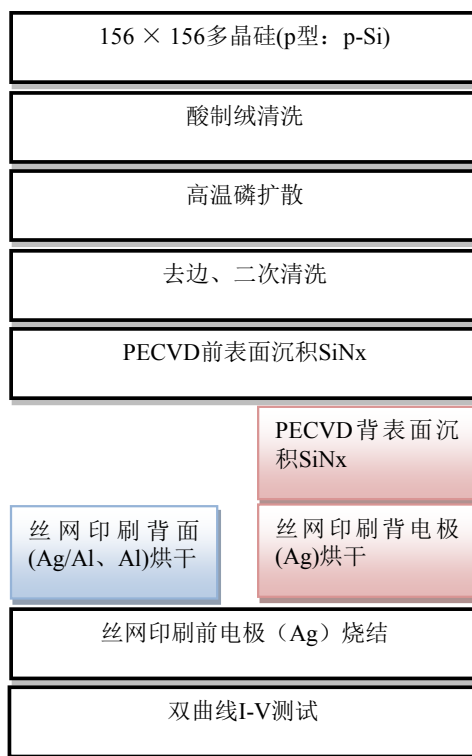


Figure 1. Manufacturing process for local contact p-Si cells (LCC)
图 1. 丝网印刷 p-Si 局域接触太阳能电池制备流程

Table 1. Mean value for parameters of both reference cells (Al-BSF) and (LCC)
表 1. 两组不同结构太阳能电池 I-V 测试参数统计平均值

分类	V_{oc}/mV	I_{sc}/A	$R_s/\text{m}\Omega$	$FF/\%$	$\eta/\%$
Al-BSF	624.6	8.635	2.74	78.70	17.44
LCC	579.7	7.792	21.34	48.20	8.95

从制备流程(图 1)可知, Al-BSF 太阳能电池及 LCC 之间的背面电极接触方式不同, 串联电阻的差异由背面电极造成。表 1 中, LCC 背面局域接触电极形成机理如下, Ag 中含有对 SiN_x 介质膜具有良好刻蚀性的玻璃料, 一定温度下玻璃料刻蚀 SiN_x 使 Ag 与 p-Si 接触形成合金, 实现电极制备。串联电阻高可能由以下原因所致: 1) 高温烧结过程中 LCC 背表面朝下放置在传送履带上, 温度低于前表面, 浆料刻蚀性能减弱使 SiN_x 介质膜成为接触阻挡层, 从而提高串联电阻; 2) 由于重力作用, Ag 中的玻璃料下沉, 削弱对 SiN_x 膜的刻蚀使之成为阻挡层, 从而提高串联电阻; 3) 常规 Ag 适用于与前表面磷扩散的 n-Si 发射区形成欧姆电极, 而 LCC 背表面为 p-Si, Ag 在与 p-Si 合金形成电极过程中可能会由于接触区掺杂类型的改变而造成失配。

为能够具体分析 LCC 串联电阻高的原因, 该文首先将表 1 中 LCC 进行二次烧结, 为保证 Ag 中的玻璃料能充分刻蚀背面 SiN_x 膜, 在第二次烧结过程中将 LCC 背表面朝上, 而前表面朝下放置在烧结传送履带上。二次烧结后串联电阻降低幅度极小, 仅降低约 $2 \text{ m}\Omega$, 但转换效率减小到 4.26%。由此可见, 二次烧结后 LCC 的串联电阻改善很小, 但转换效率降低了 52.40%, 这是因为二次烧结造成前表面电极过烧而损坏发射极, 导致漏电过大, 故而转换效率急剧减小, 开路电压降低为 342.2 mV。可见, 丝网印刷制备 LCC 电池时, Ag 中玻璃料对背面 SiN_x 的刻蚀性能或者刻蚀程度不是串联电阻大的原因, 可排除上述原因(1)和(2)。

为深入研究分析上述可能原因(3), 该文在 Ag 中掺入具有一定刻蚀性的铝浆料(Al), Al 在元素周期表中为 III-A 组元素, 最外层电子数为 3, Si 为 IV-A 组元素, Al 在半导体 Si 中扩散掺杂后, 多数载流子为空穴, 是 p 型杂质。试验测试发现, 在 Ag 中进行 Al 掺杂后, 串联电阻减小, 极大地改善 LCC 输出参数, 可见, 背局域接触电极 Ag 中进行 Al 掺杂可有效改善 Ag 与 p-Si 之间接触的匹配性。为深入了解 Al 掺杂量对串联电阻的影响, 该文对 LCC 背面局域接触电极的 Ag 进行不同程度的 Al 掺杂, 同时采用双曲线法监测串联电阻, 如图 2 所示。

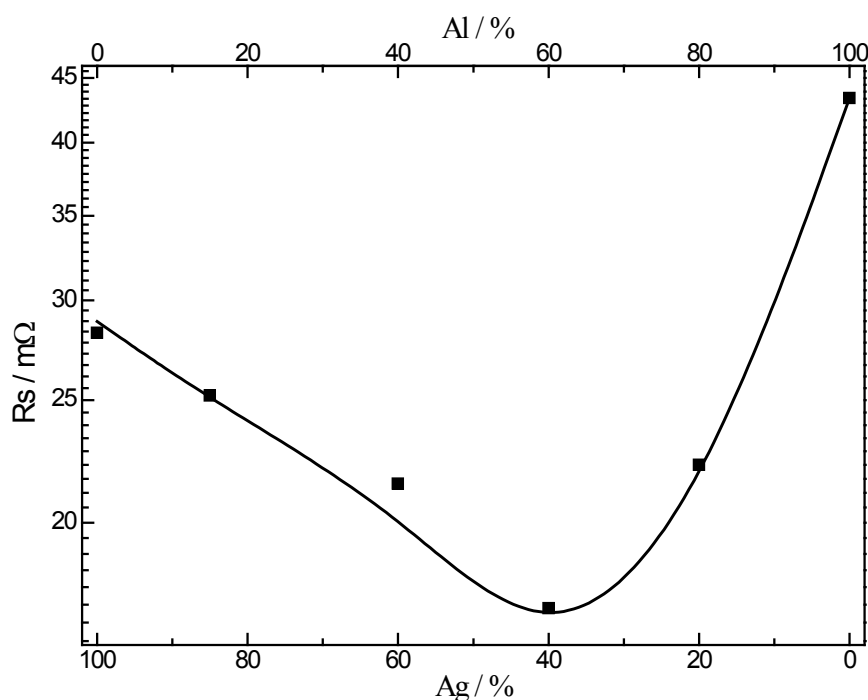


Figure 2. Influence of aluminum (Al) dopant on the series resistance (R_s) of the LCC
图 2. 串联电阻随 Al 掺杂量的变化趋势

可见,随着 Ag 中 Al 掺杂量的增大,串联电阻先减小后增大:当 Al 掺杂量为 0%时, $R_s = 28.27 \text{ m}\Omega$;随着 Ag 中 Al 掺杂量的逐渐增加,串联电阻逐渐减小,当 Al 掺杂量为 60%时串联电阻达到最小值 $17.11 \text{ m}\Omega$;此后,随着 Al 掺杂量的继续增加,串联电阻快速增大,当 Al 掺杂量为 100%时,串联电阻为 $43.38 \text{ m}\Omega$ 。

Al 掺杂量小于 60%, Ag 中掺入 Al 后,在高温烧结过程中介质膜被刻蚀后形成混合金属(Ag、Al)与 p-Si 直接接触的通道,与 Si 共同合金形成电极。在这个过程中,Al 还起到如下作用:1) Al 向 p-Si 内扩散,使电极接触的区域掺杂形成 p^+ -Si,与衬底 p-Si 构成高低结,形成局域背场,降低串联电阻的同时有效提高电池开路电压;2) Al 掺杂后, p^+ -Si 中空穴载流子浓度高于 p-Si,降低电池串联电阻;3) Al 掺杂的 Ag 电极,与 p-Si 接触形成电极,改善 Ag 与 p-Si 之间相互接触的性能,减小接触电阻,降低 LCC 的串联电阻。

但是,如果对 Ag 进行过量掺杂反而不利于串联电阻的降低,当 Al 掺杂量超过 60%,串联电阻随着 Al 掺杂量的逐渐增大而快速增大,这有两个方面的因素:1) Al 对 SiN_x 介质膜的刻蚀性比 Ag 弱,随着 Al 掺杂量不断提高,部分 SiN_x 介质膜介于金属与 p-Si 之间成为接触阻挡层,极大的提高了串联电阻;2) Ag 电阻率约为 $1.65 \times 10^{-10} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, Al 电阻率约为 $2.83 \times 10^{-10} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$,相同形状及尺寸情况下,电极电阻随着 Al 掺杂量的提高而增大,串联电阻增大。

值得指出的是,Ag 进行 Al 掺杂后,在丝网印刷区域形成 LCC 局域背接触电极过程中,Al 向 p-Si 内扩散,使电极接触区域实现掺杂形成 p^+ -Si,与 p-Si 共同构成高低结形成局域背场,有效提高 LCC 的开路电压,与文献[2]结论一致,如图 3(a)所示。随着 Al 掺杂量的不断增加, p^+ -Si 层的掺杂浓度不断提高,激发的局域背场效果更好,因而开路电压随 Al 掺杂量的不断增加而增大,当 Al 掺杂量为 0%时开路电压为 579.4 mV ,Al 掺杂量为 100%时开路电压为 597.4 mV ,比掺杂前提高 18 mV ;若掺杂量较低($\leq 60\%$),开路电压随着 Al 掺杂量的逐渐增加明显提高;若掺杂量较高($\geq 60\%$),随着 Al 掺杂量逐渐增加,开路电压变化趋于平缓,改变幅度较小。

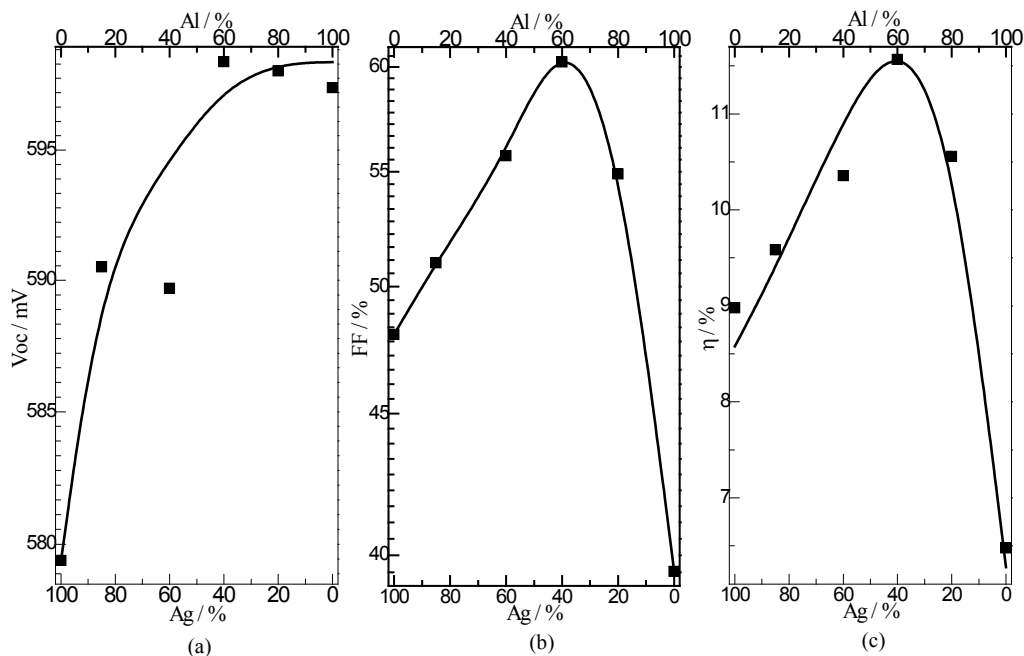


Figure 3. Open circuit voltage (V_{oc}) (a); fill factor (FF) (b); and conversion efficiency (η) (c) of LCC for different Al dopant
图 3. 开路电压(V_{oc}) (a); 填充因子(FF) (b)及转换效率(η) (c)随 Al 掺杂量的变化

由式(5)、(6)知,单位面积太阳能电池开路电压、短路电流、填充因子及转换效率之间的相互关系为 $\eta = V_{oc} \times I_{sc} \times FF/P_{in}$, Al 掺杂对开路电压的改善有利于提高转换效率。由式(2)知,串联电阻是影响填充因子的直接因素,填充因子随 Al 掺杂量变化如图 3(b)所示,当掺杂量为 60%时填充因子及转换效率达到最大值,此时,转换效率为 11.57%,较未掺杂时($\eta = 8.98\%$)提高 2.59%。过高($\geq 60\%$)掺杂量虽有利于提高 LCC 的开路电压,但由于串联电阻增大,填充因子减小,转换效率减小,如图 3(c)所示。

由此,丝网印刷制备 LCC 时,与 p-Si 接触的金属电极 Ag 中掺入适量的 p 型杂质 Al 有助于改善串联电阻,同时,在高温烧结过程中 Al 向 p-Si 内侧扩散形成重掺杂 p⁺-Si 区,形成局域背场提高开路电压,改善转换效率。但 Al 电阻率大,且对介质膜的刻蚀性弱,Al 掺杂过量会提高串联电阻,降低转换效率。

4. 结论

该文以丝网印刷方式制备 LCC,以双曲线方法监测串联电阻、研究降低串联电阻及提高转换效率的方法和途径。在 Ag 中掺入适量的 p 型杂质 Al,有助于降低串联电阻、提高开路电压和转换效率。当 Al 掺杂量达到 60%时,串联电阻降低 11 m Ω ,开路电压提高 18 mV,转换效率提高 2.59%。若掺杂量较小,串联电阻随着掺杂量增大而减小,填充因子增加,转换效率不断提高;但若掺杂量过高,由于 Al 电阻率较高,且对介质膜刻蚀性能弱,则串联电阻随着掺杂量增加而快速增大,填充因子减小,虽然开路电压能够得到进一步改善,但转换效率却不断减小。

参考文献

- [1] 陈璐, 吴翔, 魏凯峰. PERC 太阳能电池生产工艺研究[J]. 电子世界, 2017(24): 195-197.
- [2] Grohe, A., Schneiderlochner, E., Hermle, M., Preu, R., Glunz, S.W., Willeke, G. and Walz, S. (2003) Characterization of Laser-Fired Contacts Processed on Wafers With Different Resistivity. *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2, 1032-1035.
- [3] Glunz, S.W., Preu, R., Schaefer, S., Scheiderlochner, E., Pfleging, W., Ludemann, R. and Willeke, G. (2000) New Simplified Methods for Patterning the Rear Contact of RP-PERC High Efficiency Solar Cells. *Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Anchorage, AK, 15-22 September 2000, 168-171. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2000.915780>
- [4] 马丁·格林, 李秀文, 谢洪礼, 等. 太阳能电池工作原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987: 60-96.
- [5] 陈庭金, 袁海荣, 汪义川, 许开方. 工业生产硅太阳能电池的特性分析[J]. 半导体光电, 1998, 19(6): 376-379.
- [6] 汤叶华, 屈盛, 曹红彬, 王文静, 周春兰, 吴鑫, 曹晓宁. 太阳能电池生产制备中高填充因子的实现及控制[C]//中国可再生能源学会, 江苏省光伏产业协会. 第十一届中国光伏大会暨展览会会议论文集, 2010: 72-75.
- [7] 张忠文, 陈庭金, 刘祖明. 晶体硅太阳能电池的串联电阻及其测量[C]//中国第七届光伏会议, 2002.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ms@hanspub.org