

21.5%以上效率 Panda-TOPCon 双面电池技术研究

翟金叶¹, 张 伟¹, 王子谦¹, 刘大伟¹, 李 锋¹, Ingrid Romijn²

(1. 光伏材料与技术国家重点实验室, 英利能源(中国)有限公司, 保定 071051; 2. 荷兰能源研究中心, 荷兰佩滕 1755)

摘 要: 主要研究可应用于规模化生产的 TOPCon(tunnel oxide passivated contact)电池技术,该技术既可改善电池表面钝化又可促进多数载流子传输,进而提升电池的开路电压和填充因子。Panda-TOPCon 电池是在英利熊猫(Panda)电池基础上引入 TOPCon 技术,在研究中对氧化硅/多晶硅叠层(SiO₂/polySi)的表面钝化效果在 n 型硅片上进行验证,通过优化该结构中 SiO₂/polySi 掺杂、SiO₂成膜方式以及 polySi 厚度等,最终制备的 Panda-TOPCon 电池的开路电压达到 676 mV,填充因子达到 80%,实现了 21.54%的光电转换效率。

关键词: 双面电池; 钝化接触; TOPCon; 隧穿氧化层; polySi 层

中图分类号: TM615

文献标识码: A

0 引 言

随着硅片质量的提升,晶硅电池表面复合已成为制约其效率的主要因素,因此表面钝化技术尤为重要。长期以来,表面钝化一直是晶硅太阳能电池设计和优化的重中之重^[1,2],从背电场钝化到正面氮化硅钝化,再到介质层的钝化局部开孔接触的 PERC(passivated emitter and rear cell)/PERL(passivated emitter and rear locally diffusion)设计。每次钝化优化都会带来大幅的效率提升,尤其是近些年的 PERC/PERL 结构,已拥有相对完善的表面钝化结构^[3],很大程度上缓解了背面钝化的问题,但为了接触而进行开孔,不仅增加了工艺的复杂度^[4],开孔的过程还会对硅材料造成不同程度的损伤,这也额外增加了金属接触区域的复合。同时开孔限制了载流子的传输路径,导致填充因子减小。因此,钝化接触(passivated contact)技术作为一种既能实现整面钝化,且无需开孔接触的技术逐渐成为了研究的热点。

TOPCon(tunnel oxide passivated contact)是一种新型钝化接触技术,该技术在电池表面使用一层超

薄的氧化层和掺杂的薄膜硅进行钝化。同时,超薄氧化硅减少了表面态保持了较低的隧穿电阻,掺杂薄膜硅提供了场致钝化并对载流子选择性透过,与硅基底形成良好的钝化接触。2013 年 Fraunhofer ISE 推出的 TOPCon 电池^[5-7]中掺杂薄膜硅层采用的是非晶硅层^[6],但由于非晶硅薄膜对表面处理要求较高,同时无法承受后续高温工艺,人们开始将视野投向其他有钝化效果的薄膜材料。经多方实验,掺杂多晶硅薄膜^[8,9]的优势逐渐体现出来,从开始利用非晶硅退火形成多晶硅,到最后直接 LPCVD 沉积多晶硅,技术日趋成熟。在 2017 年 Fraunhofer ISE 制备的 TOPCon 电池效率达到 25.7%^[10],成为可与 HIT 竞争的另一种选择性接触电池的设计。但是,该电池采用 4 cm² 的 n 型 FZ 硅片,制备工艺复杂,多采用实验室设备完成,如正面采用溅射 ITO 和蒸镀 Ti/Pd/Ag 叠层栅线,背面蒸银作为背面电极,与产线不兼容,制备成本高。

本文将 TOPCon 技术应用于 n 型电池产线,使用 156 mm×156 mm 的 Cz 硅片进行实验研究,制备出效率大于 21.5%的高效率低成本的大尺寸 Panda-TOPCon 双面电池。

收稿日期: 2017-11-29

基金项目: 国家高技术研究发展(863)计划(2015AA050301)

通信作者: 李 锋(1980—),男,博士、高级工程师,主要从事高效太阳能电池应用开发工作。feng.li@yingli.com

1 电池结构

Panda-TOPCon 电池是在常规英利熊猫(Panda)电池的基础上引入隧穿氧化层和磷掺杂的多晶硅层,如图 1 所示。电池采用直拉法 n 型单晶硅片(156 mm×156 mm),正面依次为硼扩散发射极,氧化硅/氮化硅钝化减反射层和金属电极;背面依次为隧穿氧化层、掺杂多晶硅层、氮化硅钝化减反射层和金属电极。

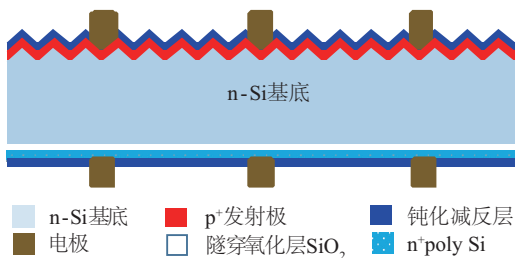


图1 Panda-TOPCon 电池结构

Fig. 1 Structure of Panda-TOPCon solar cell

Panda-TOPCon 电池结构正面与 Panda 电池结构相同,不同之处在于背面生长了一层超薄的 SiO_2 层作为表面钝化层,然后再沉积磷掺杂的 p^+ 型 polySi 层,二者共同构成背面选择性传输层。硅片靠近背表面由于能带弯曲,阻挡空穴向背面的移动,只能向前表面移动,进一步降低了表面载流子浓度,从而带来良好的背表面钝化效果。而对电子来说,虽然 SiO_2 层对电子有一个小的阻挡,但由于 SiO_2 层很薄,电子可隧穿然后通过高掺杂的 n^+ 型 polySi,被背面电极收集,如图 2 所示。

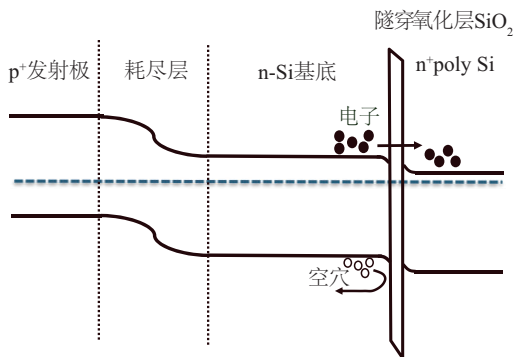


图2 Panda-TOPCon 电池能带图

Fig. 2 Band structure of Panda-TOPCon solar cell

2 研究结果与讨论

2.1 $\text{SiO}_2/\text{polySi}$ 钝化性能研究

$\text{SiO}_2/\text{polySi}$ 钝化效果是 TOPCon 电池研究的基

础,因此在进行电池研究之前,首先对 $\text{SiO}_2/\text{polySi}$ 的钝化性能进行研究。取 156 mm×156 mm 的 n 型 Cz 硅片,分别在硅片上制备双面硼扩散(BIB)对称结构,双面 $\text{SiO}_2/\text{polySi}$ (plp)对称结构,以及正面硼扩散+背面 $\text{SiO}_2/\text{polySi}$ (Blp)非对称结构。之后,将这 3 种样品同时进行双面氮化硅膜沉积和烧结处理。分别对 3 种样品进行 PL 测试以及 $\text{Implied}V_{oc}$ 测试,3 种结构不同位置的 $\text{Implied}V_{oc}$ 测试结果如图 3 所示。

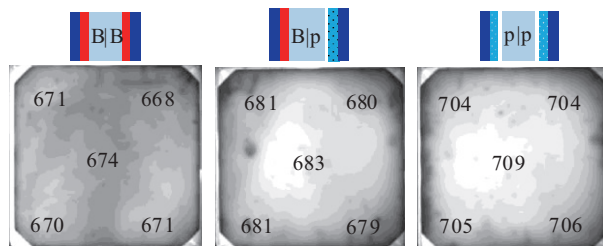


图3 不同结构的PL与 $\text{Implied}V_{oc}$ 测量结果图(单位:mV)

Fig. 3 PL and $\text{Implied}V_{oc}$ results of different test structures (unit:mV)

从图 3 中的 PL 图可看出具有 plp 结构硅片最亮,Blp 结构次之,BIB 结构最暗。同时,双面 $\text{SiO}_2/\text{polySi}$ 钝化后 $\text{Implied}V_{oc}$ 可达 700 mV 以上,即使是 Blp 结构 $\text{Implied}V_{oc}$ 也在 680 mV 以上,均明显高于常规 BIB 结构的 $\text{Implied}V_{oc}$ 值。此结构中硅片表面的超薄氧化硅对硅片表面的悬挂键、损伤等形成很好的化学钝化,同时高掺杂多晶硅的场致钝化进一步将表面复合降至更低,双重钝化的带来 $\text{Implied}V_{oc}$ 大幅提升。此结果显示出 $\text{SiO}_2/\text{polySi}$ 层对常规硅片生产可起到良好的钝化效果,并由此奠定了进一步研究的基础。

2.2 $\text{SiO}_2/\text{polySi}$ 对电池电性能影响

为进一步验证 $\text{SiO}_2/\text{polySi}$ 对电池电性能影响,首先进行最基本的电池制备实验,实验中将 60 片 n 型 Cz 硅片均分为 2 组,1 组为常规 Panda 电池,另 1 组为在常规电池基础上增加了 $\text{SiO}_2/\text{polySi}$ 钝化接触层的 Panda-TOPCon 电池。图 4 为 2 组实验的电池性能对比图。

由图 4 中可清楚地看到 Panda-TOPCon 结构电池开压高达 660 mV,最高达到 667 mV,比常规 Panda 电池高 15 mV,进一步验证了 $\text{SiO}_2/\text{polySi}$ 的钝化效果,与前面性能测试中 $\text{Implied}V_{oc}$ 结果一致。良好的表面钝化,也同时带来电流增益达到 150 mA。

虽然 FF 降低了 1.5%, Eff 最终提升仍达到 0.5%。此实验证实 Panda-TOPCon 电池的可行性, 填充因子的提升成为进一步研究优化的重点。

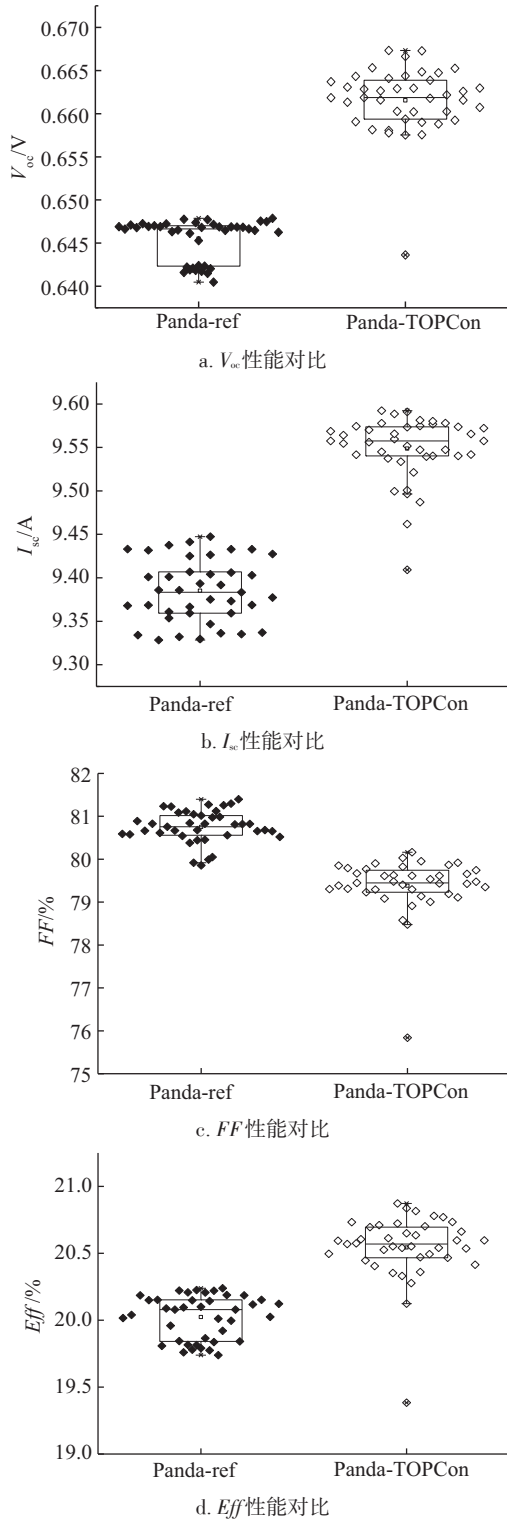


图4 $SiO_2/polySi$ 层对电池电参数的影响
Fig. 4 Influence of $SiO_2/polySi$ layer on solar cell I - V parameter

2.3 polySi中掺杂性能对 FF 的影响研究

Panda-TOPCon 电池填充的降低主要在于 n 型基底到 polySi 中载流子的输运过程以及背面电极与高掺杂的 polySi 直接接触。因此 polySi 中载流子浓度以及隧穿的载流子数量是影响 FF 的关键。因此为了研究提升 Panda-TOPCon 电池的 FF , 首先研究了 polySi 中掺杂浓度和掺杂透过 SiO_2 后的深浅对电池电性能的影响。将 150 片 n 型 Cz 硅片均分为 3 组, 分别对 polySi 层进行低(L)、中(M)、高(H) 3 种不同剂量的掺杂。图 5 为掺杂后的硅片 ECV 图, 3 种不同剂量对应的方阻分别为 52、43 和 22 Ω/\square , 从图 5 中可看到, 不同组表面掺杂浓度相同, polySi 中的磷离子浓度无明显差异, 分布深度逐渐增加。表 1 中列出了 3 种不同掺杂对应的电池参数。

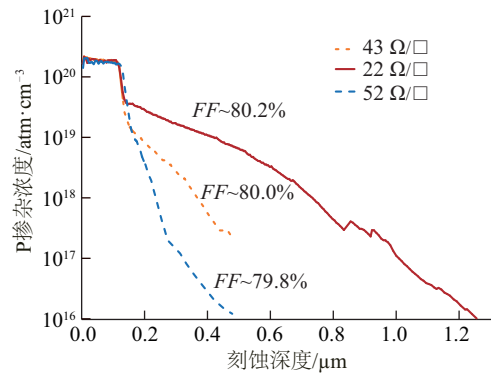


图5 polySi 层掺杂 ECV 图

Fig. 5 ECV curve of polySi doping layer

表1 不同 polySi 掺杂浓度对 Panda-TOPCon 电池参数的影响

Table 1 Influence of different polySi doping concentration on parameters of Panda-TOPCon solar cell

掺杂浓度	$R_{\square}/\Omega \cdot \square^{-1}$	V_{oc}/mV	$J_{sc}/mA \cdot m^{-2}$	$FF/\%$	$Eff/\%$
BSF-L	52	676	39.5	79.8	21.3
BSF-M	43	674	39.5	80.0	21.3
BSF-H	22	664	39.2	80.2	20.9

从表 1 中可看出随着方阻的降低, 电池填充因子 FF 略有提升, 但不明显。由此分析磷掺杂深度对填充因子 FF 影响不大, 但掺杂深度达到一定程度后, 影响了隧穿氧化层的钝化效果, 从而导致开压和电流出现大幅度降低。

2.4 SiO₂/polySi层优化

上面的实验中掺杂性能对 FF 影响并不大,因此工作重点放在隧穿上,因此从 SiO_2 的成膜性质和膜厚进行研究,在经过大量研究优化后,取得了一定成果,通过调整工艺参数,针对不同的 SiO_2 层分别进行 polySi 厚度的优化,经优化后,分别针对 2 种 SiO_2 层最佳搭配进行最终的对比,其中湿化学法(NAOS)方式形成的 SiO_2 对应的 polySi 厚度为 200 nm,热氧化(Th.Ox)对应 polySi 厚度为 100 nm,表 2 给出 2 种不同隧穿钝化层制备电池的的电性能参数。

表 2 不同隧穿钝化层电池电参数

Table 2 I - V parameters of solar cells with different tunnel oxide layers				
分组	V_{oc}/mV	$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{m}^{-2}$	$FF/\%$	$E_{eff}/\%$
NAOS+poly	675	39.6	79.9	21.4
Th.Ox+poly	675	39.7	78.4	21.0
最好电池	676	39.7	80.2	21.5

从表 2 可看出不同形式形成的 SiO_2 层与 polySi 层制备的电池开压无区别,热氧化形成的氧化硅电流略高,也就是说 SiO_2 形成对硅片表面的表面钝化效果并无太大差异。但热氧化组填充因子 FF 要明显低于湿化学氧化层制备的电池, FF 低了 1.6%,湿氧化良好的导电率主要来自缺陷辅助隧穿机制以及氧化层上的微孔。

在此次实验中获得了最高 21.54% 的转换效率,开压最高达到了 678 mV,表 3 和图 6 展示了该电池片第三方机构测试的的 I - V 结果。

3 结 论

本文主要在 n 型熊猫生产线基础上进行 TOPCon 相关技术研究, SiO_2 /polySi 钝化结构在 156 mm×156 mm 尺寸 n 型 Cz 硅片上表现出优异的钝化性能, $\text{Implied } V_{oc}$ 可达到 700 mV 以上。研究中发现隧穿氧化层 SiO_2 的成膜方式对 Panda-TOPCon 电池填充因子 FF 影响很大,湿化学法制备的 SiO_2 膜具有更优异的表现。经过大量实验研究和工艺优化,目前采用 n 型 Cz 硅片制备的大尺寸 Panda-TOPCon 电池的转换效率已超过 21.5%,电池开压超过 670 mV。

表 3 最高效 Panda-TOPCon 电池电参数

Table 3 I - V parameters of best Panda-TOPCon cell				
分组	V_{oc}/mV	$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{m}^{-2}$	$FF/\%$	$E_{eff}/\%$
正面	675.9	39.73	80.2	21.54
背面	672.5	34.77	80.45	18.82

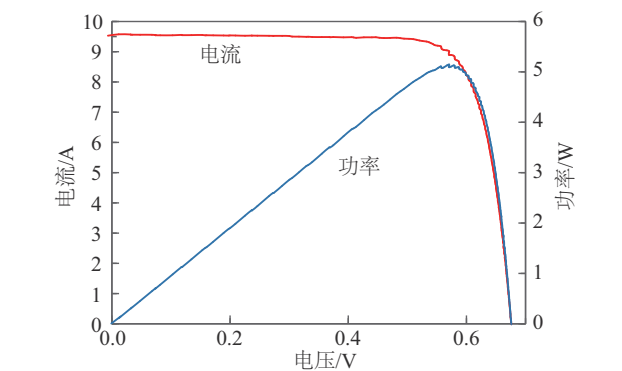


图 6 Panda-TOPCon 电池正面 I - V 曲线

Fig. 6 I - V curve of Panda-TOPCon solar cell

[参考文献]

- [1] Aberle Armin G. Surface passivation of crystalline silicon solar cells: A review[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2000, 8 (5): 473—487.
- [2] 葛 剑, 陆红艳, 乔 琦, 等. 背钝化太阳电池背面钝化膜与金属化技术的匹配研究[J]. 太阳能, 2014, (5): 33—36.
- [2] Ge jian, Lu Hongyan, Qiao Qi, et al. Study on the matching of passivation and metallization of the back passivation solar cells[J]. Solar Energy, 2014, (5): 33—36.
- [3] 周国华, 施正荣, 朱 拓, 等. 太阳电池背表面钝化的研究[J]. 能源工程, 2009, 1(1): 17—20.
- [3] Zhou Guohua, Shi Zhengrong, Zhu Tuo, et al. Study on the passivation of solar cell back surface[J]. Energy Engineering, 2009, 1(1): 17—20.
- [4] 杜 冲, 赵振杰, 陈慧君, 等. 钝化层和铝电极浆料共烧结制备硅太阳电池背电极[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(11): 72—76.
- [4] Du Chong, Zhao Zhenjie, Chen Huijun, et al. Back surface field structure of silicon solar cell by co-sintering of passivation film and aluminum paste [J]. Electronic Components and Materials, 2016, 35(11): 72—76.
- [5] Moldovan A, Feldmann F, Kai K, et al. Tunnel oxide passivated carrier-selective contacts based on ultra-thin

- SiO₂ layers grown by photo-oxidation or wet-chemical oxidation in ozonized water[A]. 42nd IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)[C], New Orleans, Los Angeles, USA, 2015.
- [6] Feldmann F, Bivour M, Reichel C, et al. Passivated rear contacts for high-efficiency n-type Si solar cells providing high interface passivation quality and excellent transport characteristics[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2014, 120(1): 270—274.
- [7] Geerligs L J, Stodolny M K, Wu Y, et al. LPCVD polysilicon passivating contacts[A]. Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes[C], Vail, Co., USA, 2016.
- [8] Römer U, Peibst R, Ohrdes T, et al. Recombination behavior and contact resistance of n⁺ and p⁺ polycrystalline Si/mono-crystalline Si junctions[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 131(12): 85—91.
- [9] Yan D, Cuevas A, Bullock J, et al. Phosphorus-diffused polysilicon contacts for solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 142(11): 75—82.
- [10] Feldmann F, Steinhäuser B, Arya V, et al. Evaluation of topcon technology on large area solar cells[A]. 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition (PVSEC)[C], Amsterdam, The Netherlands, 2017.

RESEARCH OF >21.5% HIGH EFFICIENCY PANDA-TOPCON BIFACIAL SOLAR CELL

Zhai Jinye¹, Zhang Wei¹, Wang Ziqian¹, Liu Dawei¹, Li Feng¹, Ingrid Romijn²

(1. State Key Laboratory of Photovoltaic Materials and Technology, Yingli Energy (China) Co., Ltd., Baoding 071051, China;

2. Energy Research Centre of the Netherlands, Petten 1755, Netherlands)

Abstract: In this work we study the tunnel oxide passivated contact (TOPCon) cell technology was researched. The technology can improve the surface passivation of solar cells and accelerate the majority carrier transportation, result to the increasing of the open circuit voltage and the fill factor. In our work, Panda-TOPCon technology introduced TOPCon technology based on Yingli Panda cells. In order to evaluate the surface passivation effect of the SiO₂/polySi layer on n type Si. Through optimizing the doping-process of SiO₂/polySi layer, growth methods of SiO₂ layer and the thickness of polySi layer, the champion Panda-TOPCon cell with E_{ff} of 21.54%, V_{oc} of 676 mV, and FF of 80% was obtained.

Keywords: bifacial solar cell; passivated contact; TOPCon; tunnel oxide layer; polySi layer