

自形成点接触PERC太阳电池

陈兵兵¹, 沈艳娇¹, 杨林林¹, 李锋², 许颖¹, 陈剑辉^{1*}, 麦耀华^{1,3*}

1. 河北大学物理科学与技术学院, 光伏技术研发中心, 保定 071002;
2. 英利新能源股份有限公司, 光电材料与技术国家重点实验室, 保定 071051;
3. 暨南大学信息科学技术学院, 新能源技术研究院, 广州 510632

* E-mail: chenjianhui@hbu.edu.cn; yaohuamai@hbu.edu.cn

收稿日期: 2016-12-01; 接受日期: 2017-04-24; 网络出版日期: 2017-07-27

河北省自然科学基金(批准号: E2015201203, E2014201063)和国家国际科技合作专项(批准号: 2015DFE62900)资助项目

摘要 传统钝化发射极背接触(PERC)太阳电池采用原子层沉积(ALD)法在电池背面形成全覆盖氧化铝(Al_2O_3)钝化层, 但由于 Al_2O_3 的介电特性, 需在后续工艺中通过激光开槽去除部分钝化层, 形成部分金属化部分钝化层的背表面结构, 本文采用旋涂法制备 Al_2O_3 薄膜作为PERC太阳电池的背表面钝化层, 实现了自形成点接触的背表面结构, 即金字塔表面和底部具有钝化层覆盖, 金字塔顶部没有钝化层覆盖, 从而无需使用激光开槽工艺即可完成PERC电池的局部钝化和金属化。进一步发现, 这种天然形成的点接触具有优良的电学接触特性, 在同样的工艺条件下, 获得了比全背金属接触电池略高的填充因子(FF), 不同于常规PERC电池FF低于全背金属接触电池的情况。此外还发现自形成点接触 Al_2O_3 钝化层兼具有背反射层的功能, 通过对 $\text{SiN}_x/\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 结构反射率的测试, 直接证明了背钝化层可以增强长波区太阳光的内反射。电池的开路电压(V_{oc}), 短路电流密度(J_{sc})均有提升, 转换效率(η)提高约1%。

关键词 Al_2O_3 , PERC太阳电池, 钝化层, 溶胶-凝胶法

1 引言

能源危机的加剧促使光伏产业迅猛发展, 晶体硅太阳电池作为传统的光电转化器件其效率也在不断提升, 最高的电池效率已达26.33%(<http://www.kaneka.co.jp/kaneka-e/>)。硅异质结(HIT)电池、叉指背接触(IBC)电池、隧穿氧化层钝化接触(TOPCon)电池以及钝化发射极背接触(PERC)电池, 是当前晶硅电池领域的几种高效电池技术^[1-5]。高效率实现的一个重要方面是硅表面钝化技术, 例

如上述几种高效电池的成功分别在于使用了等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)制备的氮化硅(SiN_x)或非晶硅(a-Si), 热氧化法制备的二氧化硅(SiO_2)以及原子层沉积法(ALD)制备的三氧化二铝(Al_2O_3)^[6]等优良表面钝化方案。

表面钝化机制通常分为化学钝化和场钝化两种: 化学钝化是钝化材料与硅片表面发生化学反应, 成键, 进而减少表面硅悬键, 达到钝化的目的; 场钝化是指利用钝化材料中的带电离子产生的库仑场驱赶硅片近表面的电子或者空穴使其远离表面进而减少它们

引用格式: 陈兵兵, 沈艳娇, 杨林林, 等. 自形成点接触PERC太阳电池. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 965~971
Chen B B, Shen Y J, Yang L L, et al. Self-formed point-contact PERC solar cells (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47: 965~971, doi: [10.1360/N092016-00420](https://doi.org/10.1360/N092016-00420)

的表面复合,从而实现钝化的效果^[7-9]. 基于氧化铝钝化技术的PERC电池正是利用上述的场钝化原理,即氧化铝薄膜中含有固定的负电荷,可以排斥p型硅基底中的少子(电子)而吸引其中的多子(空穴),进而实现阻挡少子复合促进多子输运的目的(有利于改善太阳电池的性能)^[8-10]. 目前PERC电池背表面通常采用ALD法制备的Al₂O₃作为钝化层^[7,11,12],此种制备方法优点是成膜质量高,不足之处是生长速度慢,且制备过程中需要高真空和危险气源(三甲基铝),增加成本的同时带来安全隐患. 此外ALD法制备的Al₂O₃由于会均匀覆盖电池的整个背表面,且因Al₂O₃是一种介电材料,不具有导电性,所以在硅太阳电池的生产后期工艺中,需要激光开槽,形成栅线与硅的局部接触以完成金属化,这不但增加工艺复杂性,也无可避免地增加了实现有效金/半接触的难度,限制了填充因子(FF)的提高^[13].

针对以上问题本文采用非真空、低成本的溶胶-凝胶法(sol-gel)制备Al₂O₃薄膜(sol-gel-Al₂O₃)作为PERC电池背表面钝化层,我们发现由于旋涂时硅片表面金字塔纵向不同位置的离心力不同而使得Al₂O₃并不是均匀地分布在金字塔表面,塔底被全部覆盖而塔尖基本裸露,如此在后道金属化工艺过程中电极与晶体硅表面在塔尖实现了天然的局部接触,从而避免了激光开槽工艺的使用以简化工艺. 这种天然的局部接触由于金字塔塔尖突出而易于金属化,可以实现大于全背金属接触电池的FF,而不是像传统PERC电池技术那样,受限于激光开槽后难以全面金属化而使得FF低于全背金属接触的情况. 此外所形成背表面钝化层兼具有背反射的功能,使得电池的性能有明显地提升.

2 实验

2.1 电池的制备

使用溶胶-凝胶法在Ag(栅状)/SiN_x/n⁺/p-Si衬底上生长Al₂O₃钝化层,其中所用硅片为双面金字塔结构. Al₂O₃为20%水胶态分散体悬浊液,再加入异丙醇混合稀释(Al₂O₃与异丙醇的体积比为1:2),超声30 min使溶液混合充分,形成前驱体溶液. 实验时首先在p型硅背面采用匀胶机实现前驱体溶液涂布于基片表面:先以500 r/min的速度旋转6 s,后经过4500 r/min高速旋转30 s. 接着使用板式炉,将匀胶后的湿膜在150℃下烘

烤30 min,使溶剂挥发,获得薄膜的厚度约为300 nm,最后采用蒸发法制备金属Al电极.

为了形成良好的Al/Si金半接触甚至Al背场,对蒸发的Al薄膜进行快速退火(RTA)处理. 在PERC电池制备前,需要首先摸索这一工艺. 图1给出了不同退火温度下电池的性能,各样品退火时间为30 s. 可以看到,随着退火温度从室温到450℃,电池的开路电压(V_{oc})和填充因子(FF)明显增加. 这里,V_{oc}和FF的改善可以确定是因为退火过程中Si/Al界面特性的改善引起的(我们尝试了Si/Ag(溅射法)在同样的退火条件下电池性能的变化,发现电池性能未见明显提升). FF的改善可以理解为Si/Al接触特性的改善^[14-16],V_{oc}的改善通常与Al背场有关,但一般认为形成掺杂Al背场需要在600℃以上实现^[17,18]. 本文进一步试验了溅射Al薄膜作为背电极,也没有观察到明显的V_{oc}被退火增强的现象,因此推断这里的V_{oc}改善应该与蒸发法制备的Al薄膜有关. 采用X射线衍射仪(XRD)研究了RTA前后蒸发Al薄膜的结晶情况,如图1插图(i)所示,我们发现在RTA之前蒸发Al薄膜XRD衍射峰较弱,表明其结晶度较差,而在RTA之后,衍射峰明显增强,即结晶度增加. 据文献报道,材料结晶度增加会使其功函数随之增加^[19]. 对p型硅太阳电池来说,背接触层的功函数增加,将会减少背界面空穴势垒的高度,如图1插图(ii)所示,这相当于背场的功能,将导致V_{oc}的增加. 由图中可以看出退火温度在450~550℃之间电池的性能最佳,因此本文选取这一方法的最佳条件以便集中研究sol-gel-Al₂O₃的自形成点接触特性对PERC电池的影响. 由于样品是全背金属电池(无背钝化层)的结果,考虑到加入Al₂O₃钝化层后金属与半导体的接触面积变小,所以选择550℃作为进一步PERC电池的退火温度. 引入sol-gel-Al₂O₃背钝化层后,电池结构如图2所示,此电池的基本方案是通过旋涂技术实现塔底被氧化铝薄膜覆盖完成钝化功能,而塔顶无氧化铝覆盖层,可以与金属电极直接接触以传导电荷.

2.2 电池性能表征及分析

应用扫描电子显微镜(SEM)对sol-gel-Al₂O₃和sol-gel-Al₂O₃/Al薄膜覆盖的电池背表面形貌进行分析,应用太阳光模拟器对电池的IV特性进行分析,应用太阳能电池光谱响应测试装置(IPCE)和紫外-近红外光谱

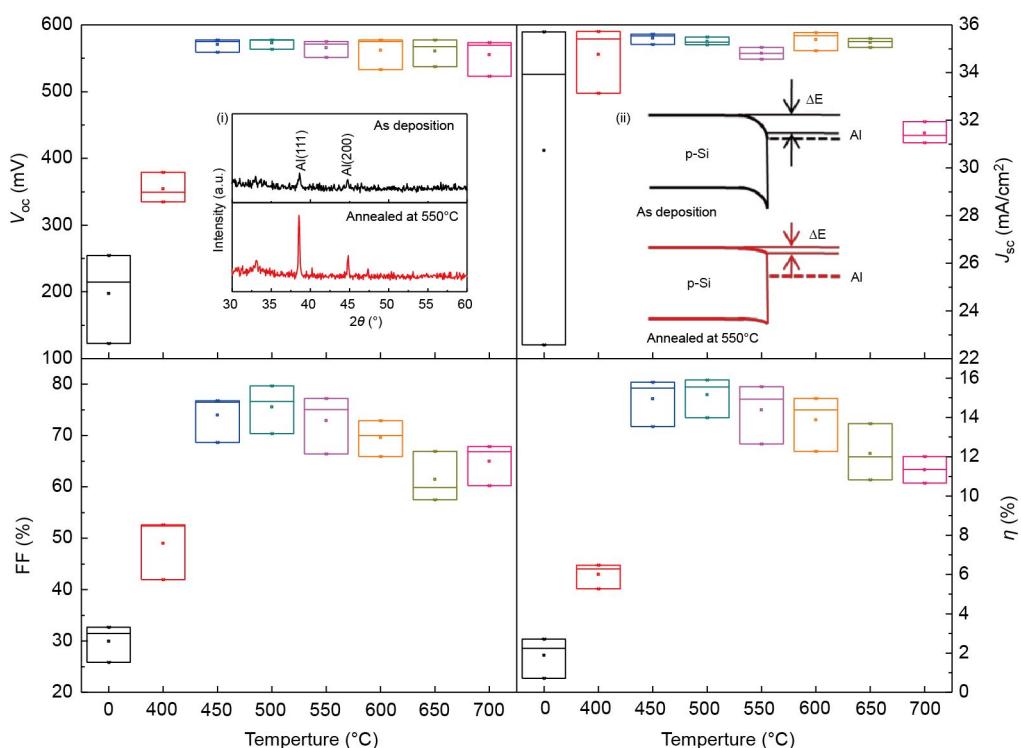


图1 (网络版彩图)全背Al电池性能随快速退火温度的变化. 插图(i)表示热蒸发铝薄膜退火前后XRD衍射峰的变化; 插图(ii)表示退火前后界面势垒的变化, 其中虚线代表Al费米能级的变化

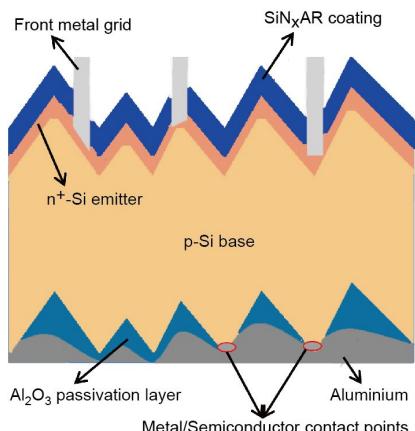


图2 (网络版彩图) Sol-gel-Al₂O₃钝化背表面电池的结构示意图

仪分别对电池的外量子效率及反射率进行分析.

3 结果与讨论

由图3(a)可见, 电池背面金字塔除塔尖外大部分已经被sol-gel-Al₂O₃钝化薄膜覆盖, 插图清楚地显示了

裸露的塔尖形貌, 图3(c)为薄膜截面形貌图(测试时硅片倾斜5°), 直观地展示了sol-gel-Al₂O₃薄膜在金字塔硅表面形成了天然的局部钝化. 在生长背Al电极后, 我们可以观察到良好的点接触情形(图3(b)和(d)).

除了图3所示单晶硅片上常规尺寸(~5 μm)金字塔^[19]表面被sol-gel-Al₂O₃薄膜覆盖情况, 之外, 我们还研究了具有不同金字塔形状的单晶硅片以及酸制绒多晶硅片表面的sol-gel-Al₂O₃薄膜分布(注: 不同形状的金字塔是通过碱溶液微抛光(rounding)工艺实现的), 如图4所示. 其中图4(a)和(c)为无薄膜覆盖, 分别具有约2.5 μm和1 μm金字塔的单晶硅片. 图4(e)为无薄膜覆盖的多晶制绒硅片. 由图3(c), 4(b)和(d)对比可看出sol-gel-Al₂O₃在不同形状金字塔上覆盖度不同, 金字塔越平整, 薄膜覆盖面积越大, 塔尖裸露越少, 自成点接触面积越小. 从图4(f)中观察到sol-gel-Al₂O₃在多晶制绒硅片上仍可形成局部覆盖与局部裸露, 从而实现点接触.

图5为有sol-gel-Al₂O₃与无sol-gel-Al₂O₃钝化层电池性能的比较, 数据显示sol-gel-Al₂O₃钝化背表面硅太

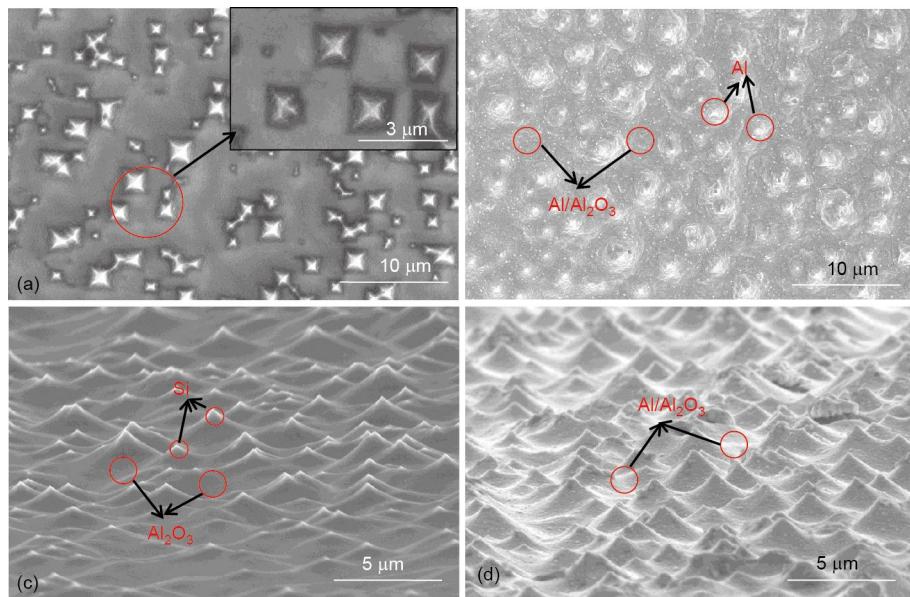


图3 (网络版彩图) SEM观察电池背表面形貌. (a) Sol-gel-Al₂O₃; (b) sol-gel-Al₂O₃/Al覆盖电池背表面金字塔的SEM形貌; (c) 和(d)分别为(a)和(b)的截面图

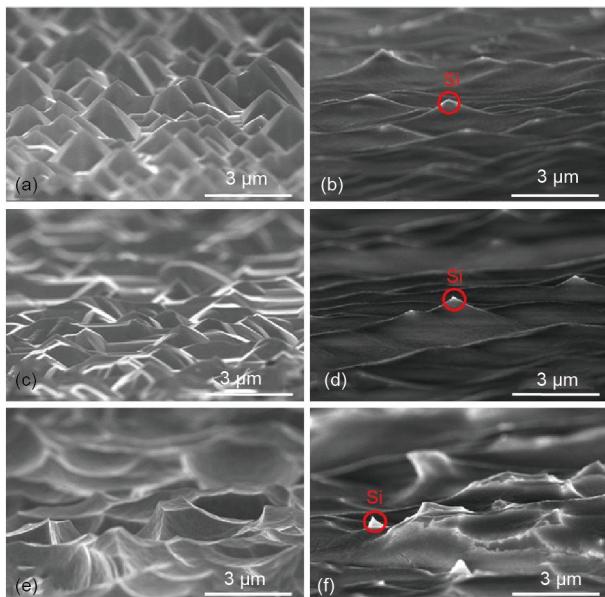


图4 (网络版彩图) SEM观察不同硅片薄膜分布形貌. (a), (c)为无薄膜覆盖的不同形状金字塔的单晶硅片; (e)为无薄膜覆盖的多晶制绒硅片; (b), (d), (f)分别为sol-gel-Al₂O₃在相应硅片上的分布情况

阳电池的 V_{oc} 、短路电流密度(J_{sc})以及FF均大于无sol-gel-Al₂O₃钝化电池，电池的转化效率(η)提升大约1%。 V_{oc} 的提升是因为氧化铝背钝化减少了背面复合，

J_{sc} 的提升可以解释为氧化铝电介质增强了太阳光红外波段的内反射。通常，对于背钝化硅太阳电池，FF会略微下降，因为相比全背Al接触的硅太阳电池，局部钝化电池在对钝化层激光开槽时难以形成更好的金半接触^[18-21]。但这一常规的‘正常现象’只是技术问题，并非理论上局部接触的电池FF就应该低于全部接触。可以看到，通过溶胶凝胶法形成的天然的点接触电池FF就可以超过全背金属电池的FF，这是因为FF也随着 V_{oc} 的增加而增加，换句话说，钝化的改善也会导致FF的改善^[21]。但在常规的Al₂O₃背钝化硅太阳电池中，这一改善效果被局部接触电阻增加导致的FF下降抵消，最终导致有Al₂O₃钝化层的电池FF相比全背金属接触电池略低。溶胶凝胶法制备的自形成点接触氧化铝钝化层，由于旋涂技术对金字塔纵向不同位置的离心力和溶液分布量不同，形成了金字塔塔尖无钝化层的情况。随后的蒸发法以紧密接触的形式在这些裸露的塔顶成膜，从而实现了良好的局部接触。这将可能导致钝化改善FF，而局部接触不削弱FF的结果。为了证明这一点，我们测试了两组电池的Suns- V_{oc} 性能，可以看到Suns- V_{oc} 与前面的标准 V_{oc} 趋势相同。另外，pFF是与接触电阻无关的‘假’填充因子，反映载流子在输运过程中的复合情况^[22]，可以看到，pFF与FF也有一致的变化趋势，表明FF的改善来自于钝化效果的提升。

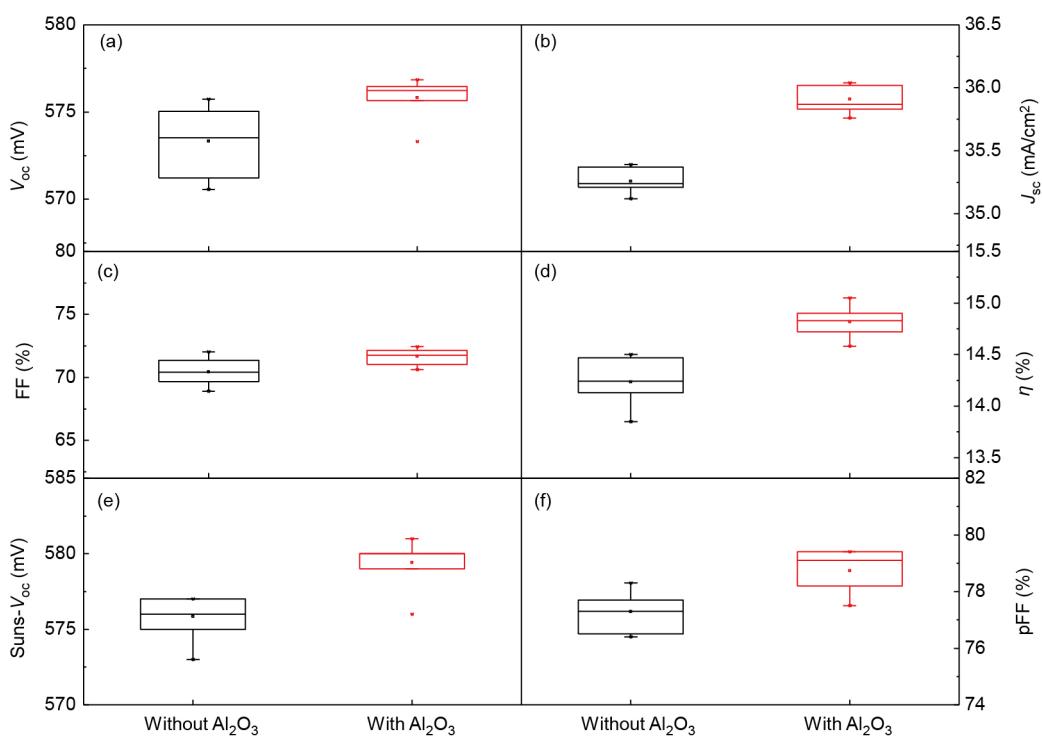


图 5 (网络版彩图) 有 Al_2O_3 与无 Al_2O_3 钝化层电池性能测试结果

图6所示外量子效率(EQE)曲线,可以看到有钝化层的电池,它的电流改善主要来自长波区。由于长波区的光子可以到达背表面,因此长波响应的增强通常归因于背表面内反射的增强^[22-24]。但是很少有直接的证据证明这一点,这里我们测试不含正面栅线的半成品电池结构的反射率,如图6插图所示,可以直接观察到含有背钝化层的样品具有更高的长波区反射率,直

接证实 Al_2O_3 除作为钝化层外同时还具有内反射层的功能。

图7给出了电池的暗态J-V曲线。根据二极管方程可知,品质因子可通过暗态饱和电流密度曲线的直线部分求得^[25],图中可以看出加入sol-gel- Al_2O_3 钝化层的直线区斜率大于无钝化层的,表明有钝化层电池的复

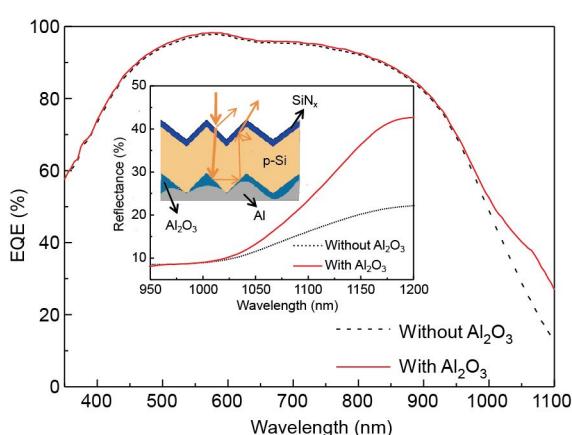


图 6 (网络版彩图) 有 sol-gel- Al_2O_3 与无 sol-gel- Al_2O_3 钝化层电池的外量子效率及半成品电池(无正面栅线)反射率的变化

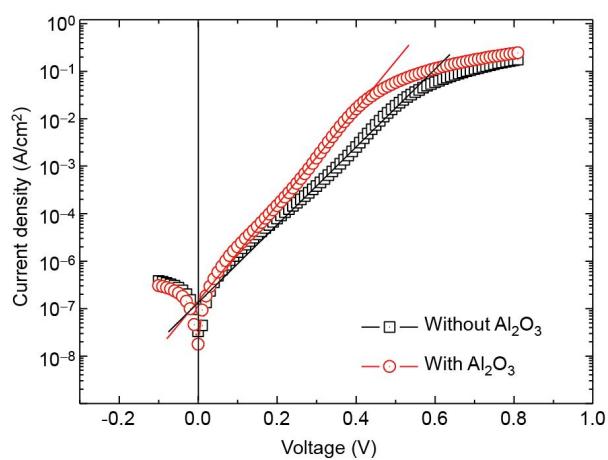


图 7 (网络版彩图) 有 sol-gel- Al_2O_3 与无 sol-gel- Al_2O_3 钝化层电池暗态J-V变化

合更低, 解释了电池 V_{oc} 增加的原因.

4 结论

本文用sol-gel-Al₂O₃钝化背表面硅太阳电池, 在电池的背表面形成天然的局部接触, 实现了自形成点接触. 分别在不同金字塔尺寸的单晶硅和酸制绒凹坑结构的多晶硅表面观察到了无钝化层覆盖的尖端结构, 该结构正好为进一步的点接触金属化提供了便利, 从而可以简化PERC电池的制备工艺并提升其电池性能. 利用此种方法得到电池的 V_{oc} , J_{sc} 及 η 均有所提升, 特别

是FF, 得益于优良的背钝化和点接触特征, FF可以实现局部接触大于全背金属接触的结果. 电池开路电压的提升主要由于Al₂O₃的局部钝化作用, 减小了背表面复合, 而电流的提升被直接证实是由于Al₂O₃钝化层使得电池的内反射增加, 从而提升了电池对长波区的利用率. 这一工作为PERC电池的制备提供了新的技术思路, 即通过一种非真空低成本的钝化层制备技术, 实现自形成点接触, 完成PERC电池所需的局部钝化局部金属化, 为下一步降低PERC电池生产成本提供了一种备选方案.

参考文献

- 1 Franklin E, Fong K, McIntosh K, et al. Design, fabrication and characterisation of a 24.4% efficient interdigitated back contact solar cell. *Prog Photovolt-Res Appl*, 2016, 24: 411–427
- 2 Green M A. The passivated emitter and rear cell (PERC): From conception to mass production. *Sol Energ Mat Sol C*, 2015, 143: 190–197
- 3 Li Z, Yang Y, Zhang X L, et al. Pilot production of 6 inch IBC solar cells yielding an average efficiency of 23% with a low-cost industrial process. In: 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC). Munich, Germany, 2016
- 4 Li Q, Tao K, Sun Y, et al. Replacing the amorphous silicon thin layer with microcrystalline silicon thin layer in TOPCon solar cells. *Sol Energ*, 2016, 135: 487–492
- 5 魏世源, 孙伟海, 陈志坚, 等. 太阳能电池效率分析. 科学通报, 2016, 61: 1748–1753
- 6 Balaji N, Hussain S Q, Park C, et al. Surface passivation schemes for high-efficiency c-Si solar cells—A review. *Trans Electr Electron Mater*, 2015, 16: 227–233
- 7 Seguini G, Cianci E, Wiemer C, et al. Si surface passivation by Al₂O₃ thin films deposited using a low thermal budget atomic layer deposition process. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 131603
- 8 Metz A, Adler D, Bagus S, et al. Industrial high performance crystalline silicon solar cells and modules based on rear surface passivation technology. *Sol Energ Mat Sol C*, 2014, 120: 417–425
- 9 Hoex B, Schmidt J, Bock R, et al. Excellent passivation of highly doped p-type Si surfaces by the negative-charge-dielectric Al₂O₃. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 112107
- 10 Batra N, Gope J, Vandana Jagannath P, et al. Influence of deposition temperature of thermal ALD deposited Al₂O₃ films on silicon surface passivation. *AIP Adv*, 2015, 5: 067113
- 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. *Prog Photovolt-Res Appl*, 2012, 20: 260–268
- 12 Dullweber T, Gatz S, Hannebauer H, et al. Towards 20% efficient large-area screen-printed rear-passivated silicon solar cells. *Prog Photovolt-Res Appl*, 2012, 20: 630–638
- 13 Ye F, Yuan N Y, Ding J N, et al. The performance of thin industrial passivated emitter and rear contacts solar cells with homogeneous emitters. *J Renew Sust Energ*, 2015, 7: 013122
- 14 Olsen L C, Barton D L, Miller W, et al. Physical structure of Al-p-Si metal-insulator semiconductor solar cells. *J Appl Phys*, 1980, 51: 6393–6398
- 15 Benick J, Richter A, Hermle M, et al. Thermal stability of the Al₂O₃ passivation on p-type silicon surfaces for solar cell applications. *Phys Stat Sol*, 2009, 3: 233–235
- 16 Lauermann T, Fröhlich B, Hahn G, et al. Diffusion-based model of local Al back surface field formation for industrial passivated emitter and rear cell solar cells. *Prog Photovolt-Res Appl*, 2015, 23: 10–18
- 17 Urrejola E, Peter K, Plagwitz H, et al. Al-Si alloy formation in narrow p-type Si contact areas for rear passivated solar cells. *J Appl Phys*, 2010, 107: 124516
- 18 Wang A, Zhao J, Green M A. 24% efficient silicon solar cells. *Appl Phys Lett*, 1990, 57: 602–604

- 19 Oh W K, Hussain S Q, Lee Y J, et al. Study on the ITO work function and hole injection barrier at the interface of ITO/a-Si:H(p) in amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells. *Mater Res Bull*, 2012, 47: 3032–3035
- 20 Ebong A, Upadhyay A, Keanl J, et al. Effect of surface cleaning on pyramid size of randomly textured mono crystalline silicon and the impact on solar cell efficiency. In: 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Seattle: IEEE, 2011
- 21 Kim T, Lim J K, Shin H N R, et al. 21%-efficient PERL solar cells with plated front contacts on industrial 156 mm p-type crystalline silicon wafers. *Energ Procedia*, 2014, 55: 431–436
- 22 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. *Sol Energ Mat Sol C*, 2014, 120: 270–274
- 23 Saint-Cast P, Benick J, Kania D, et al. High-efficiency c-Si solar cells passivated with ALD and PECVD aluminum oxide. *IEEE Electron Device Lett*, 2010, 31: 695–697
- 24 Wenham S R, Zhao J, Dai X, et al. Surface passivation in high efficiency silicon solar cells. *Sol Energ Mat Sol C*, 2001, 65: 377–384
- 25 Yang B, Yuan Y B, Sharma P, et al. Tuning the energy level offset between donor and acceptor with ferroelectric dipole layers for increased efficiency in bilayer organic photovoltaic cells. *Adv Mater*, 2012, 24: 1455–1460

Self-formed point-contact PERC solar cells

CHEN BingBing¹, SHEN YanJiao¹, YANG LinLin¹, LI Feng², XU Ying¹,
CHEN JianHui¹ & MAI YaoHua^{1,3}

¹ Institute of Photovoltaics, College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China;

² State Key Laboratory of Photovoltaic Materials & Technology, Yingli Green Energy Holding Co., Ltd., Baoding 071051, China;

³ Institute of New Energy Technology, College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

In this paper, the Al₂O₃ film was prepared by sol-gel method (sol-gel-Al₂O₃) as the rear surface passivation layer of passivated emitter rear contact (PERC) solar cells. It was found that the Al₂O₃ passivation layer provided a self-formed local contact, i.e. the passivation layer existed in the bottom and the inclined plane instead of the top, of the pyramid. Thus, unlike the conventional PERC solar cells, no laser ablation is used in this PERC solar cells with sol-gel-Al₂O₃ passivation layer. The results show that this kind of self-formed point-contact technology has very good electrical contact characteristics. This effect leads to that this PERC cell slightly surpasses the solar cell with the full back metal contact in the fill factor (FF), which is different from the conventional PERC cell with laser ablation. It was also found that the introduction of sol-gel-Al₂O₃ passivation layer can improve the infrared light absorption in the cell. By measuring the reflection of the SiN_x/Si/Al₂O₃/Al geometry, it was directly demonstrated that sol-gel-Al₂O₃ passivation layer enhanced the internal reflection in the cell. The open circuit voltage (V_{oc}) and short circuit current density (J_{sc}) of the cell were improved, and the conversion efficiency (η) finally increased by 1%.

Al₂O₃, PERC solar cells, passivation layer, sol-gel method

doi: 10.1360/N092016-00420