

文章编号: 1000-7032(2018)06-0777-07

## 工业级纳米绒面多晶硅太阳能电池的制备及其性能研究

邱小永<sup>1,3</sup>, 赵庆国<sup>1,3</sup>, 陆 波<sup>1</sup>, 何一峰<sup>1</sup>, 李小飞<sup>1</sup>, 张 帅<sup>2</sup>, 吕文辉<sup>1,2\*</sup>

(1. 浙江贝盛光伏股份有限公司, 浙江 湖州 313008;

2. 湖州师范学院理学院 应用物理系, 浙江 湖州 313000; 3. 浙江创盛光能源有限公司, 浙江 湖州 313008)

**摘要:** 基于产线工艺制备了纳米绒面多晶硅太阳能电池, 并表征其光电转换性能。研究结果表明: 相对传统微米绒坑, 纳米绒面能够提升多晶硅太阳能电池的短路电流, 相应的光电转换效率绝对值提升大于 0.4%, 产线均值光电转换效率超过了 19.1%。结合漫反射光谱和外量子效率测试结果, 改进的光电转换的原因归结为纳米绒面能够有效地诱捕短波和长波太阳光子, 增强短波和长波太阳光响应。本研究证实纳米绒面多晶硅太阳能电池可利用产线工艺制备且具有较高的光电转换效率, 能够实现产业化。

**关键词:** 多晶硅太阳能电池; 纳米绒面; 反应离子刻蚀; 光电转换效率

中图分类号: TM914.4 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20183906.0777

## Fabrication and Performance of Nano-textured Multi-crystalline Silicon Solar Cells for Industrial Production

QIU Xiao-yong<sup>1,3</sup>, ZHAO Qing-guo<sup>1,3</sup>, LU Bo<sup>1</sup>, HE Yi-feng<sup>1</sup>,LI Xiao-fei<sup>1</sup>, ZHANG Shuai<sup>2</sup>, LYU Wen-hui<sup>1,2\*</sup>

(1. Zhejiang Beyondsun PV Co., Ltd., Huzhou 313008, China;

2. Department of Applied Physics, College of Science Huzhou University, Huzhou 313000, China;

3. Zhejiang Trunsun Solar Co., Ltd., Huzhou 313008, China)

\* Corresponding Author, E-mail: whlv@zjhu.edu.cn

**Abstract:** Nano-textured multi-crystalline silicon solar cells were fabricated on industrial production line. The nano-textured multi-crystalline silicon solar cells showed an improved short-circuit current as compare to traditional multi-crystalline silicon solar cells, and resulting in an increasing amount of >0.4% for power conversion efficiency and up to 19.1%. The light reflectance spectra and the external quantum efficiency of the nano-textured multi-crystalline silicon solar cells were investigated. The improved power conversion efficiency was attributed to enhanced light trapping and light response by the nano-structure. The results confirm that the nano-textured multi-crystalline silicon solar cells can be produced by using the industrial production process, and has high power conversion efficiency.

**Key words:** multi-crystalline silicon solar cells; nano-structure; reactive ion etching; power conversion efficiency

收稿日期: 2017-09-21; 修订日期: 2017-12-27

基金项目: 湖州市重点研发计划重点项目(2017ZD2011); 湖州市南太湖精英计划创新团队项目; 浙江省自然科学基金(LY15F040002)资助项目

Supported by Science and Technology Project of Huzhou City(2017ZD2011); Fund of South Lake Tai Elite Program of Huzhou City; Natural Science Foundation of Zhejiang Province(LY15F040002)

## 1 引 言

多晶硅太阳能电池是光伏市场中的主流产品,近年来其市场占有率为 60%~75%<sup>[1]</sup>。但其发电成本依然偏高,无法实现平价上网,需要进一步研发提高其光电转换效率或降低其生产成本。降低多晶硅太阳能电池前表面的光反射损失是提高其光电转换性能的一个途径。在工业生产中,多晶硅太阳能电池前表面主要采用传统湿法混酸刻蚀(Wet acidic etching, WAE)<sup>[2-3]</sup>制备微米尺寸的减反射绒坑,随后在其表面制备氮化硅减反光膜<sup>[4-5]</sup>,降低其前表面的光反射损失。可是,微米尺寸的绒坑的减反光性能有限,相对于单晶硅太阳能电池表面碱刻蚀法<sup>[6]</sup>制备的金字塔绒面的光反射率高 3%~5%。因此,需要开发可工业生产的新型绒面结构及制备工艺,有效地降低多晶硅太阳能电池前表面的光反射损失,从而达到提高其光电转换效率的目的。

最近的研究结果表明,晶体硅表面制作纳米绒面结构可实现较低的光反射损失<sup>[7-12]</sup>。纳米绒面结构制备可采用金属辅助化学刻蚀(Metal-assisted chemical etching, MACE)<sup>[13]</sup>法或反应离子刻蚀(Reactive ion etching, RIE)<sup>[14]</sup>法制备。其中,在 MACE 制绒过程中需使用贵金属离子,大规模生产需要考虑贵金属环境污染问题,且大面积纳米绒面的均匀性和稳定性存在问题,需要进一步优化。采用 RIE 法制备纳米绒面结构应用于多晶硅太阳能电池倍受关注<sup>[15-16]</sup>,实验室已经获得了基于纳米绒面结构的多晶硅太阳能电池。进一步推动纳米绒面多晶硅电池产业化,需要将 RIE 工艺与多晶硅太阳能电池后续产线工艺集成,在多晶硅太阳能电池生产线上获得工业级纳米绒面多晶硅太阳能电池。在此基础上,进一步表征工业级纳米绒面多晶硅太阳能电池的光电转换性能,评价和验证其产业化的可行性。

本研究采用 RIE 法在产品尺寸(156 mm × 156 mm)的多晶硅片表面制备了纳米绒面结构,并结合后续多晶硅太阳能电池的产线工艺制备了纳米绒面多晶硅太阳能电池。对比研究传统 WAE 工艺制备微米尺寸的绒坑结构和 RIE 工艺制备纳米绒面结构的多晶硅太阳能电池在模拟太阳光照下的光电参数,表征和评价工业级纳米绒面多晶硅太阳能电池的光电转换性能,获得了绒面结构影响

多晶硅太阳能电池光电转换性能的关键因素。进一步,测试两种绒面结构镀膜前后的漫反光谱及相应多晶硅太阳能电池的外量子效率,理解和认识纳米绒面结构增强多晶硅太阳能电池光电转换性能的物理机制。

## 2 实 验

采用多晶硅太阳能电池的产线工艺制备微米绒坑和纳米绒面,在此基础上制备两种绒面结构的多晶硅太阳能电池,优化和匹配集成各个制备工艺,获得高效率多晶硅太阳能电池。两种绒面结构的多晶硅太阳能电池的制备工艺过程如图 1 所示。以 500 片 156 mm × 156 mm 面积的砂浆切割 P 型太阳能级多晶硅片为原料,获得两种绒面结构的完整电池片。主要的工艺步骤如下:

### (1) 制绒工艺

采用传统湿法混酸刻蚀(WAE)工艺制备微米尺寸的绒坑,即在多晶太阳能电池产线上的多晶硅链式制绒机台上利用硝酸和氢氟酸混合水溶液各向同性腐蚀多晶硅片表面,获得 500 片微米绒坑结构的多晶硅片。其中,250 片直接用于后续多晶硅太阳能电池制备,另外 250 片进一步采用反应离子刻蚀(RIE)工艺制备纳米绒面。在纳米绒面制作中,以六氟化硫、氧气和氯气为刻蚀气体,在工业生产级的反应离子刻蚀机台上利用射频电场使混合气体辉光放电,产生活性氟离子,对多晶硅片表面进行轰击和化学刻蚀,形成纳米结构的金字塔绒面。

### (2) 扩散工艺

采用多步扩散工艺将三氯氧磷中的磷原子扩散到 p 型硅表面中,形成 pn 结;通过预淀积扩散源、扩散、高温推进三个过程中的时间、温度及扩散源流量等参数控制,实现扩散层方块电阻的控制,优化的工艺参数使得扩散层方阻为 95~105 Ω/□。

### (3) 背刻工艺

运用硝酸和氢氟酸的混酸溶液刻蚀电池片<sup>[17]</sup>,去除其四周和背表面的 pn 结;同时“镜面”化电池背表面,有效地改进长波太阳光从其背表面到基极的内部反射。

### (4) 镀膜工艺

采用管式 PECVD 工艺制备双层氮化硅减反钝化膜<sup>[18]</sup>,底层选用高折射率氮化硅,有效地钝

化扩散层表面,顶层选用低折射率氮化硅,实现较低的光反射损失。优化的双层氮化硅有效折射率约为 2.08,厚度为 78 ~ 83 nm。

### (5) 印刷与烧结工艺

采用丝网印刷工艺印刷背银、背铝背面电极及五主栅密细栅正面银电极,通过共烧结形成铝背场及形成正面欧姆接触。最终获得完整的多晶硅太阳能电池片。

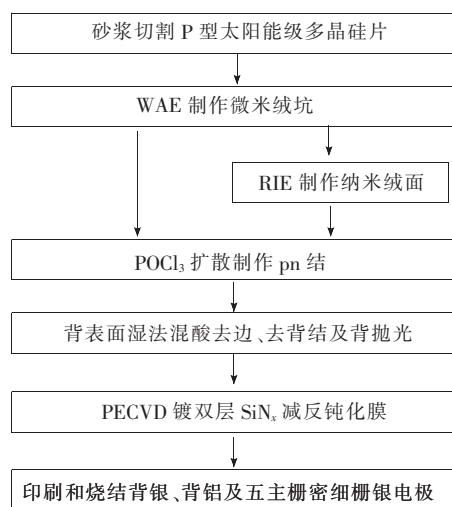


图 1 两种绒面结构的多晶硅太阳能电池制备工艺过程

Fig. 1 Fabrication process of the multi-crystalline silicon solar cells for nano-texturing and micro-texturing, respectively.

采用扫描电子显微镜 (SEM) 表征 WAE 工艺、WAE 和 RIE 相结合工艺两种途径制备的减反绒面的形貌。在  $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$  的 AM1.5G 模拟太阳光照下测试两种绒面结构多晶硅太阳能电池片的光电转换性能,对比两种绒面结构对电池光电转性能的影响。在此基础上,测试镀氮化硅前后两种减反绒面的漫反射光谱及两种绒面结构的多晶硅太阳能电池片的外量子效率,认识和理解绒面结构对电池光电转性能影响的主要物理机制。

## 3 结果与讨论

图 2 为 WAE 工艺、WAE 和 RIE 相结合工艺两种途径制备的减反绒面的扫描电子显微镜 (SEM) 照片。图 2(a) 显示 WAE 法腐蚀的多晶硅表面均匀分布着高密度的蠕虫状绒坑,绒坑宽度  $2 \sim 4 \mu\text{m}$ ,长度  $3 \sim 9 \mu\text{m}$ 。相应放大倍率的形貌如图 2(b) 所示,绒坑的表面光滑,有利于表面钝化及减少光生载流子的表面复合。WAE 法制备微

米尺寸的绒坑结构包括两步化学反应。首先,硝酸作为氧化剂与激活能低表面微裂纹处的硅反应,生成二氧化硅,隔绝硅与硝酸反应;随后,生成的二氧化硅被氢氟酸反应,生成溶解于水的六氟硅酸,从而硝酸与裂缝处硅再次接触反应。重复上述两步化学反应,多晶硅表面损伤裂缝逐渐变宽、加深,最终形成蠕虫状腐蚀坑。因此,在整个工艺过程中需要控制刻蚀时间,刻蚀时间过短绒坑的宽度低,不利于后续表面钝化;刻蚀时间过长绒坑互联宽度过大且深度降低,不利于绒面的减反光性能。图 2(c) 显示了在 WAE 法制备绒坑表面进一步引入 RIE 处理的多晶硅表面的形貌。图中显示高密度的蠕虫状绒坑表面变得粗糙,微米尺寸的绒坑表面上存在更小尺寸的结构。相应放大倍率的形貌如图 2(d) 所示,图中清晰显示经过 RIE 工艺处理绒坑表面上分布着纳米尺寸的绒面。该纳米绒面为开口状,绒面顶部开口  $280 \sim 420 \text{ nm}$ ,其顶部至底部尺寸逐渐减小,呈类似倒金字塔结构。RIE 法制备纳米尺寸开口状绒面结构的机制是自掩模下的化学反应<sup>[14]</sup>。在 RIE 法多晶硅制绒过程中,在高频电场的作用下使  $\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{Cl}_2$  混合气体辉光放电,产生活性氟离子与多晶硅片表面进行化学反应,生成能够移除的四氟化硅气体。同时,在反应过程中也产生了氧自由基生成离散的  $\text{Si}_x\text{O}_y\text{F}_z$  膜附着在硅表面,创造自掩模

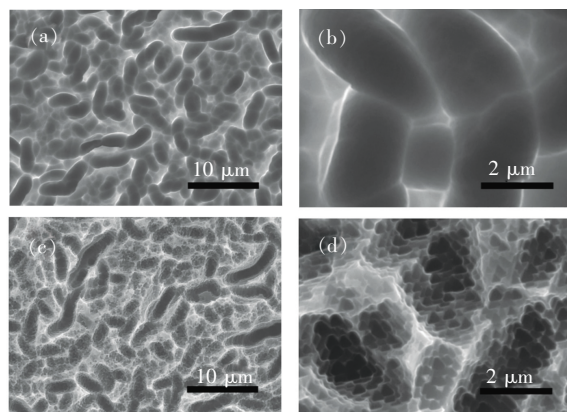


图 2 (a),(b) WAE 法制备的微米绒坑减反结构的扫描电子显微镜照片;(c),(d) 结合 WAE 法和 RIE 法制备的纳米绒面减反结构的扫描电子显微镜照片。

Fig. 2 (a), (b) SEM images of conventional WAE processed the multi-crystalline silicon wafers. (c), (d) SEM images of RIE processed the multi-crystalline silicon wafers.

效应<sup>[14]</sup>,未被  $\text{Si}_x\text{O}_y\text{F}_z$  覆盖区域被氟离子刻蚀。在上述自掩模选域刻蚀的作用下,多晶硅表面微米尺寸的绒坑表面形成纳米尺寸开口状的纳米绒面结构。

图 3(a)、(b)、(c)和(d)为两种绒面结构多晶硅太阳能电池的短路电流、开路电压、填充因子和光电转换效率的分布统计结果。从图中的统计规律显示纳米绒面结构的多晶硅太阳能电池的均值短路电流明显高于微米尺寸绒坑结构的多晶硅太阳能电池,而纳米绒面结构的多晶硅太阳能电池的均值开路电压和均值填充因子却略低于微米尺寸绒坑结构的多晶硅太阳能电池。综合短路电流、开路电压、填充因子 3 个因素,纳米绒面结构电池片的均

值光电转换效率明显高于 WAE 法获得微米尺寸绒坑结构的多晶硅太阳能电池,该结果证实 RIE 法制备的纳米绒面能够有效地增强多晶硅太阳能电池的光电转换。根据光伏理论,晶体硅太阳能电池的光电转换效率取决于短路电流、开路电压、填充因子,具体表达式为:

$$\eta_{\text{PCE}} = \frac{I_{\text{sc}} V_{\text{oc}} K_{\text{FF}}}{AP_{\text{AMI.5G}}}, \quad (1)$$

其中  $\eta_{\text{PCE}}$  为光电转换效率,  $I_{\text{sc}}$  为短路电流,  $V_{\text{oc}}$  为开路电压,  $K_{\text{FF}}$  为填充因子,  $A$  为电池面积,  $P_{\text{AMI.5G}} = 100 \text{ mW/cm}^2$  为 AM1.5G 模拟太阳光的功率。为了明确纳米绒面多晶硅太阳能电池片光电转换效率提升的起源,表 1 统计了两种绒面结构的多晶硅太阳能电池

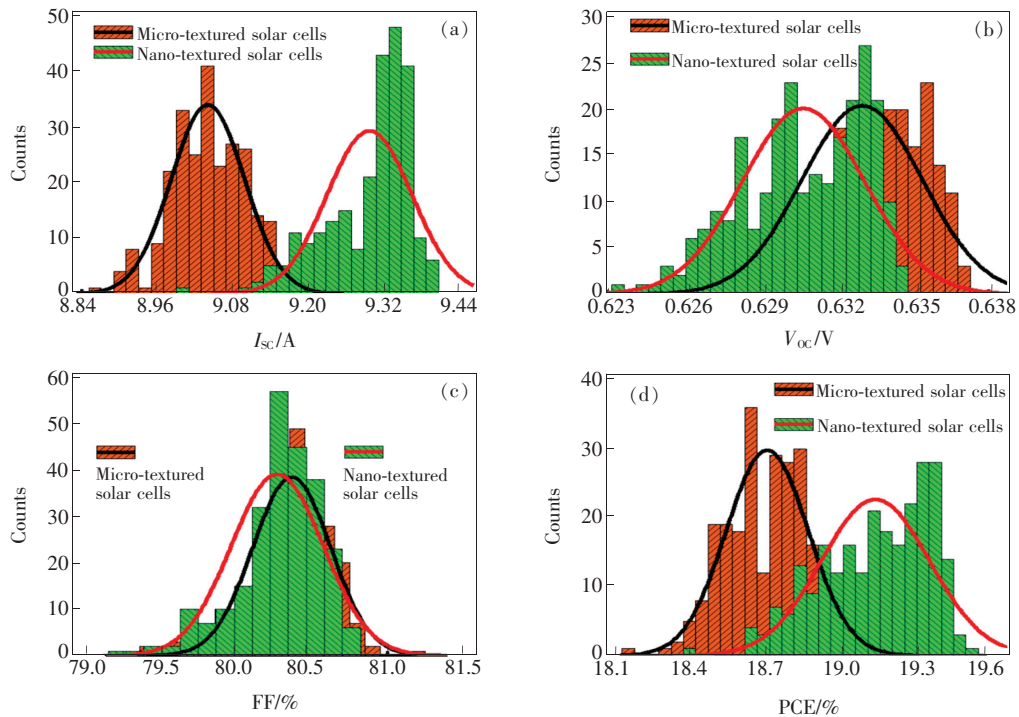


图 3 两种绒面结构的多晶硅太阳能电池的短路电流(a)、开路电压(b)、填充因子(c)和光电转换效率(d)的分布。

Fig. 3 Performance parameter distributions of the multi-crystalline silicon solar cells for nano-texturing and micro-texturing, respectively. (a) Short-circuit currents. (b) Open-circuit voltages. (c) Fill factors. (d) Power conversion efficiency.

片的均值光电参数。纳米绒面结构的多晶硅太阳能电池的均值短路电流相对于微米尺寸绒坑结构的多晶硅太阳能电池提升比率为 2.87%,而纳米绒面结构的多晶硅太阳能电池的均值开路电压和均值填充因子相对于微米尺寸绒坑结构的电池片仅降低比率分别为 0.316% 和 0.112%,提升比例相对降低比例高一个数量级。依据公式(1),短路电流、开路电压和填充因子三者均正比于光电转换效率,且实验室获得了纳米绒面结构的多晶硅太阳

表 1 两种绒面结构的多晶硅太阳能电池的关键光电参数

Tab. 1 Performance parameters of the multi-crystalline silicon solar cells for nano-texturing and micro-texturing, respectively

	$I_{\text{sc}}/\text{A}$	$V_{\text{oc}}/\text{V}$	FF/%	PCE/%
Micro-textured cells	9.04	0.633	80.36	18.71
Nano-textured cells	9.30	0.631	80.27	19.15
Enhanced ratio	2.87%	-0.316%	-0.112%	2.35

电池的均值光电转换效率相对提升比率为 2.35%,因此纳米绒面多晶硅太阳能电池光电转换效率的提升源于短路电流。

本研究中,RIE 纳米绒面多晶硅太阳能电池的产线均值光电转换效率超过了 19.1%,相对于传统 WAE 微米尺寸绒坑结构的多晶硅太阳能电池的产线均值光电转换效率绝对值提升大于 0.4%,最大光电转换效率可达到 19.56%。如表 2 统计对比所示,本研究 RIE 纳米绒面多晶硅太阳能电池最佳电池的光电转换效率相对于文献报道的 RIE 法制备纳米绒面结构<sup>[15-16]</sup>和 MACE 法制备纳米绒面结构<sup>[19]</sup>的多晶硅太阳能电池有所提升。其主要原因是:本研究制备的 RIE 纳米绒面多晶硅太阳能电池采用了五主栅密细栅浅匹配浅结高方阻扩散层的光电结构,优化了氮化硅钝化减反膜系参

表 2 文献报道的 RIE 和 MACE 制备纳米绒面结构的多晶硅太阳能电池的关键光电参数

Tab. 2 Performance parameters of RIE and MACE nano-textured multi-crystalline silicon solar cells

制备方法	RIE 参考文献[15]	RIE 参考文献[16]	MACE 参考文献[19]	RIE 本研究工作*
PCE/%	18.49	18.72	18.45	19.56

为了理解纳米绒面结构有效地增强多晶硅太阳能电池的物理原因,需要进一步理解两种绒面结构的多晶硅太阳能电池片的短路电流。晶体硅太阳能电池的短路电流  $I_{SC}$  可表示为:

$$I_{SC} = A \int_{300 \text{ nm}}^{1100 \text{ nm}} \eta_{EQE}(\lambda) \times \frac{I_{AM1.5G}(\lambda)}{(hc/\lambda)} d\lambda = A \int_{300 \text{ nm}}^{1100 \text{ nm}} [1 - R(\lambda)] \times \eta_{IQE}(\lambda) \times \frac{I_{AM1.5G}(\lambda)}{(hc/\lambda)} d\lambda, \quad (2)$$

其中  $A$  为电池的面积,  $\lambda$  为光波波长,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $\eta_{EQE}(\lambda)$  为外量子效率,  $\eta_{IQE}(\lambda)$  为内量子效率,  $R(\lambda)$  为反射率,  $I_{AM1.5G}(\lambda)$  为标准的 AM1.5G 的太阳光谱强度。依据公式(2),太阳能电池的短路电流取决于外量子效率,并且光反射率直接影响着外量子效率,进一步决定着短路电流。本研究测试了微米绒坑和纳米绒面在镀氮化硅减反膜前后的漫反射光谱,结果如图 4(a)所示。图中显示,在 300~1100 nm 的光谱范围内,纳米绒面相对于微米绒坑具有更低的光反射损失。产生光反射率差异的原因是二者具有不同的绒面结构。纳米绒面为开口状准倒置金字塔形状,纳米尺寸的结构可利用光衍射和光散射效应降低光反射损失。另外,入射光

数,同时结合了 RIE 法制备纳米绒面结构,最终实现了各光电结构和各产线工艺的有效集成。产业上,MACE 法制备的纳米绒面能够使电池光电转换效率绝对值提升约 0.3%,其附加工艺及使用化学品等使得单片电池成本提升 0.15~0.20 元(RMB);而 RIE 法制备的纳米绒面能够使电池光电转换效率绝对值提升约 0.4%,其附加设备及使用特气、化学品等使得单片电池成本提升 0.30~0.40 元(RMB)。二者相比较,RIE 法对电池对提升效率有优势,而 MACE 法具有成本优势。另外,RIE 法制备纳米绒面多晶硅太阳能电池工艺稳定,易于实现大批量生产。而 MACE 法制备纳米绒面多晶硅太阳能电池的工艺稳定性和重复性需要进一步探究,且工艺中使用贵金属离子,需要考虑环境污染问题。

在类倒金字塔绒面上产生 2 次以上的光反射<sup>[20]</sup>,第 1 次反射光将再次入射到绒面表面,随后一部分反射损失,而另一部再次入射到硅中被吸收,有效地降低了光反射损失;而微米绒面为蠕虫状绒坑,这种结构产生的光反射次数将低于倒金字塔结构,不利于降低光反射损失。同时,图 4(a)漫反射光谱证实,上述两种绒面结构表面引入氮化硅减反光层后光反射损失进一步降低,光干涉效应使得波长在 630 nm 附近两种绒面结构的光反射率均几乎为 0。然而,在短波范围和长波范围,纳米绒面的光反射率相对微米绒坑明显降低,表明纳米绒面结构覆盖氮化硅膜后具有更优异的短波和长波光捕获性能。根据公式(2),较低的光反射损失能够使得多晶硅太阳能电池获得更高的外量子效率及短路电流。图 4(b)中外量子效率测试结果证实,纳米绒面结构多晶硅太阳能电池具有相对增强的短波光响应和长波光响应。综合光电转换效率的决定式(1)和短路电流的决定式(2),纳米绒面结构增强多晶硅太阳能电池光电转换的物理原因可归结为:纳米绒面具有更有效地诱捕短波和长波太阳光子的能力,增强短波和长波太阳光响应。

晶硅太阳能电池的开路电压  $V_{oc}$ <sup>[11]</sup>可表示为:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{SC}}{I_{OB} + I_{OE}} + 1 \right) \approx \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{SC}}{I_{OB} + I_{OE}} \right), \quad (3)$$

其中,  $kT/q = 0.02585$  V 为热电势,  $I_{SC}$  为短路电流,  $I_{OB}$  为基极饱和电流,  $I_{OE}$  为发射极饱和电流。依据公式(3)可知, 电池的开路电压取决于短路电流、基极和发射极饱和电流。本研究中纳米绒面结构的多晶硅太阳能电池具有提升的短路电流, 则其开路电压将有所提升, 可实际上纳米绒面结构的多晶硅太阳能电池相对于微米尺寸绒坑结构的电池片降低了约 2 mV。依据该实验结果和公式(3), 说明纳米绒面结构的多晶硅太阳能电池的基极和发射极饱和电流之和相对增加。另外, 两种

电池片所用材料及背表面制备工艺完全一样, 基极饱和电流可认为一致, 从而可推测纳米绒面结构的多晶硅太阳能电池前表面的发射极饱和电流增大。实际上, 二者不同之处在于前表面具有不同结构的绒面结构, 纳米绒面具有更高的表面积, 这将导致发射极表面光生载流子表面复合增加, 使得发射极饱和电流上升, 从而降低了开路电压。因此, 纳米绒面的几何外形能够增强电池片的光捕获, 提升了短路电流; 但其大的表面积使得电池片前表面光生载流子表面复合加大, 降低了开路电压; 光捕获优势最终战胜表面复合缺点, 获得了增强的光电转换。

上述研究结果表明, 纳米绒面结构能够采用工业化生产的反应离子刻蚀工艺制备, 并可将其与后续多晶硅太阳能电池产线工艺匹配集成, 获得工业级的纳米绒面多晶硅太阳能电池。该纳米绒面结构能够使多晶硅太阳能电池更有效地捕获短波和长波太阳光子, 增强其对短波和长波太阳光响应, 从而提升短路电流和光电转换效率, 最终产线均值光电转换效率超过了 19.1%。纳米绒面多晶硅太阳能电池可采用工业化工艺制备, 工业级样品的光电转换效率高, 可将其进行产业化, 推进光伏发电平价上网。

## 4 结 论

结合湿法混酸刻蚀(WAE)和反应离子刻蚀(RIE)在多晶硅表面制备了纳米绒面结构, 并将其与后续多晶硅太阳能电池的产线工艺集成, 获得了工业级纳米绒面多晶硅太阳能电池。其光电转换性能研究结果表明, 相对于传统法 WAE 法制备的微米绒坑, 纳米绒面结构能够有效地增强多晶硅太阳能电池的光电转换, 绝对光电转换效率提升大于 0.4%, 产线均值光电转换效率超过了 19.1%。基于漫反射光谱及外量子效率测试结果, 改进的光电转换的原因归结为纳米绒面能够有效地诱捕短波和长波太阳光子, 增强短波和长波太阳光响应。本研究证实纳米绒面多晶硅太阳能电池可利用产线工艺制备, 且具有较高的光电转换效率, 易实现产业化。

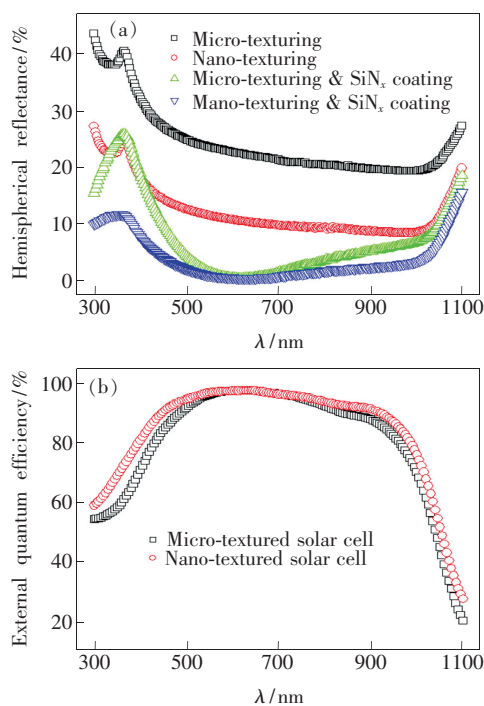


图 4 (a) 微米绒坑和纳米绒面在镀氮化硅减反膜前后的漫反射光谱; (b) 微米绒坑的多晶硅太阳能电池和纳米绒面的多晶硅太阳能电池的外量子效率。

Fig. 4 (a) Hemispherical reflectance spectra of the multi-crystalline silicon wafers before and after deposition of SiN<sub>x</sub> coating for nano-texturing and micro-texturing, respectively. (b) External quantum efficiency of the multi-crystalline silicon solar cells for nano-texturing and micro-texturing.

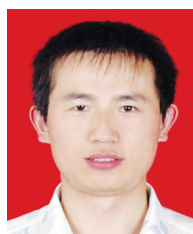
## 参 考 文 献:

- [ 1 ] FORSTNER H, BANDIL S, ZWEGERS M, *et al.*. International technology roadmap for photovoltaic (ITRPV) [ R/OL]. 7th ed. <http://www.itrpv.net/>.
- [ 2 ] NISHIMOTO Y, ISHIHARA T, NAMBA K. Investigation of acidic texturization for multicrystalline silicon solar cells [ J].

- J. Electrochem. Soc.*, 1999, 146:457-461.
- [ 3 ] CHENG Y T, HO J J, TSAI S Y, *et al.*. Efficiency improved by acid texturization for multi-crystalline silicon solar cells [J]. *Solar Energy*, 2011, 85:87-94.
- [ 4 ] DUTTAGUPTA S, MA F, HOEX B, *et al.*. Optimised antireflection coatings using silicon nitride on textured silicon surfaces based on measurements and multidimensional modelling [J]. *Energy Procedia*, 2012, 15:78-83.
- [ 5 ] LIU B, QIU S, CHEN N, *et al.*. Double-layered silicon nitride antireflection coatings for multicrystalline silicon solar cells [J]. *Mater. Sci. Semicond. Proc.*, 2013, 16:1014-1021.
- [ 6 ] SEIDEL H, CSEPREGI L, HEUBERGER A, *et al.*. Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1990, 137:3612-3626.
- [ 7 ] PENG K Q, XU Y, WU Y, *et al.*. Aligned single-crystalline Si nanowire arrays for photovoltaic applications [J]. *Small*, 2005, 1:1062-1067.
- [ 8 ] SRIVASTAVA S K, KUMAR D, SINGH P K, *et al.*. Excellent antireflection properties of vertical silicon nanowire arrays [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2010, 94:1506-1511.
- [ 9 ] HUANG Y F, CHATTOPADHYAY S, JEN Y J, *et al.*. Improved broadband and quasioimnidirectional anti-reflection properties with biomimetic silicon nanostructures [J]. *Nat. Nanotechnol.* 2007, 2:770-774.
- [ 10 ] OH J, YUAN H C, BRANZ H M. An 18.2% -efficient black-silicon solar cell achieved through control of carrier recombination in nanostructures [J]. *Nat. Nanotech.*, 2012, 7:743-748.
- [ 11 ] HUANG Z, ZHONG S, HUA X, *et al.*. An effective way to simultaneous realization of excellent optical and electrical performance in large scale Si nano/microstructures [J]. *Prog. Photovolt. : Res. Appl.*, 2015, 23(8):964-972.
- [ 12 ] ZHONG S, HUANG Z, LIN X, *et al.*. High efficiency nanostructured silicon solar cells on a large scale realized through the suppression of recombination channels [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27:555-561.
- [ 13 ] ZHANG M L, PENG K Q, FAN X, *et al.*. Preparation of large-area uniform silicon nanowires arrays through metal-assisted chemical etching [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2008, 112(12):4444-4450.
- [ 14 ] RUBY D S, ZAIDI S H, NARAYANAN S, *et al.*. Rie-texturing of multicrystalline silicon solar cells [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2002, 74:133-137.
- [ 15 ] LIU S, NIU X, SHAN W, *et al.*. Improvement of conversion efficiency of multicrystalline silicon solar cells by incorporating reactive ion etching texturing [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2014, 127:21-26.
- [ 16 ] FENG P, LIU G, WU W, *et al.*. Improving the blue response and efficiency of multicrystalline silicon solar cells by surface nanotexturing [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2016, 37:306-309.
- [ 17 ] 吕文辉, 陆波, 龚熠, 等. 多晶硅太阳能电池背表面刻蚀提升其性能的产线工艺研究 [J]. *光电子·激光*, 2016, 27(6):606-612.
- LU W H, LU B, GONG Y, *et al.*. Enhanced power conversion efficiency in multi-crystalline silicon solar cells using back surface etching for industrial production line application [J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2016, 27(6):606-612. (in Chinese)
- [ 18 ] 吕文辉, 何一峰, 龚熠, 等. 双层氮化硅减反、钝化结构对多晶硅太阳能电池性能的影响 [J]. *半导体光电*, 2016, 37(5):707-711.
- LU W H, HE Y F, GONG Y, *et al.*. Effect of double-layer SiN<sub>x</sub> antireflection/passivation coating on performance of multi-crystalline silicon solar cells [J]. *Semicond. Optoelectron.*, 2016, 37(5):707-711. (in Chinese)
- [ 19 ] YE X Y, ZOU S, CHEN K X, *et al.*. 18.45% -efficient multi-crystalline silicon solar cells with novel nanoscale pseudopyramid texture [J]. *Adv. Funct. Mater.* 2014, 24:6708-6716.
- [ 20 ] KESSELS W E, SCHULTZ O, BENICK J, *et al.*. High efficiency n-type Si solar cells on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-passivated boron emitters [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92:253504.



邱小永(1979 -),男,浙江湖州人,2009年创建浙江贝盛光伏股份有限公司,主要从事晶硅太阳能电池、光伏发电技术及应用方面的研究。  
E-mail: Billy. qiu@beyondsunpv.com



吕文辉(1981 -),男,内蒙古赤峰人,博士,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事晶硅太阳能电池材料、物理及高效器件的研究。  
E-mail: whlv@zjhu.edu.cn