

化学抛光对硅基异质结太阳能电池性能的影响

姜元建^{1*}, 张晓丹², 赵颖²

¹菏泽学院物理与电子工程学院, 山东 菏泽 274015;

²南开大学光电子薄膜器件与技术研究所光电子薄膜器件与技术天津市重点实验室, 天津 300071

摘要 针对非晶硅薄膜沉积时金字塔沟壑处容易出现外延生长的问题,采用化学抛光液 CP133 对硅片表面进行了抛光处理。研究表明,抛光使得金字塔底部区域形貌由“V”型变成了“U”型,明显改善了非晶硅/晶体硅界面的钝化效果。抛光溶液温度低于 30 °C 时难以发挥腐蚀作用,但当溶液的起始温度升高至 35 °C 时,获得了较好的抛光效果。采用质量分数为 1% 的 NaOH 溶液制绒且抛光时间为 30 s 时,太阳能电池性能较佳。

关键词 表面光学; 界面处理; 化学抛光; 硅基异质结太阳能电池; 钝化; 金字塔形貌; 制绒

中图分类号 O649

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.062402

Influence of Chemical Polishing on Performances of Silicon Heterojunction Solar Cells

Jiang Yuanjian^{1*}, Zhang Xiaodan², Zhao Ying²

¹College of Physics and Electronic Engineering, Heze University, Heze, Shandong 274015, China;

²Key Laboratory of Optoelectronic Thin Film Devices and Technology of Tianjin City, Institute of Photo-Electronic Thin Film Devices and Technology, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract Aiming to avoid the local epitaxial growth of amorphous silicon films in the pyramidal valleys of the textured silicon wafers, a chemical polishing mixture named CP133 is used to polish the textured crystalline silicon (c-Si) surfaces. The research results show that the morphologies of the pyramidal valleys change from V shape to U shape, which clearly improves the passivation effect at the hydrogenated amorphous silicon/crystalline silicon interface. When the temperature is lower than 30 °C, the solution is difficult to react with the crystalline silicon. However, the problem can be solved by the increase of the solution temperature up to 35 °C. The performance of the solar cells is relatively good when the polishing time is 30 s and the NaOH texturing solution has a mass fraction of 1%.

Key words surface optics; interface treatment; chemical polishing; silicon heterojunction solar cell; passivation; pyramid morphology; texturing

OCIS codes 350.6050; 240.6700; 040.6040; 040.5350

1 引言

硅基异质结(SHJ)太阳能电池由于具有转换效率高、制备成本低、稳定性好等特点,近年来,在学术界和工业界都受到了广泛关注^[1-6]。对于晶体硅电池,在硅片表面进行制绒,使其表面布满金字塔形貌,以减少对入射光的反射,可明显地提高电池的短路电

流密度,这是一个在光伏产业界和研究领域都普遍采用的工艺方法^[7-11]。然而,对于硅基异质结电池来说,人们却发现在制绒硅片上直接沉积非晶硅薄膜,电池开路电压不甚理想,分析非晶硅/晶体硅(hydrogenated amorphous silicon(a-Si:H)/crystalline silicon(c-Si))界面发现,在金字塔的谷底出现了外延生长的情况^[12]。这些外延生长的薄膜

收稿日期: 2018-08-31; 修回日期: 2018-09-01; 录用日期: 2018-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(61474065,61504069)、高等学校学科创新引智计划(简称 111 计划)(B16027)、山东省自然科学基金博士基金(ZR2017BEE061)、菏泽学院科研基金博士基金(XY17BS01)

* E-mail: jiyjok3@sina.com

具有较高缺陷态密度,极大地增加了光生载流子在 a-Si:H/c-Si 界面处的复合概率,从而使开路电压明显下降^[13]。显然这对电池制造来说非常不利。可见,制绒硅片的表面形貌是影响电池性能的一个重要因素。为了防止外延生长,必须对制绒硅表面进行特殊处理。相关研究显示,通过采用制绒后再对硅片表面进行各向同性腐蚀的方法,可修饰硅的表面形貌,使金字塔底部和顶部变得平滑,以达到防止外延生长的目的^[14-15]。

本文采用 CP133 化学抛光液[由氢氟酸(体积分数为 40%, HF)、硝酸(体积分数为 100%, HNO₃)、冰乙酸(体积分数为 100%, CH₃COOH)按照 1:3:3 的体积比配制而成]来对制绒后的硅片表面进行各向同性腐蚀,并对抛光时间和溶液温度等因素对钝化及电池性能的影响进行了分析探讨。为选择适于硅基异质结电池硅衬底表面金字塔尺寸范围,分别对质量分数为 2% 和 1% 的 NaOH 溶液[$w(\text{NaOH})=2\%, 1\%$]制绒的硅片进行了化学抛光实验,研究了其对太阳电池性能的影响。

2 实验过程

制绒时和太阳电池制备时所用的硅片都是商业化的硅衬底。具体硅片为(100)晶向的 N 型直拉单晶硅切割片,厚度为 200 μm ,电阻率为 1~3 $\Omega\cdot\text{cm}$,面积为 5 cm \times 5 cm。硅片制绒清洗的工艺流程与文献[10]相同。清洗制绒工艺中每一步完成后都要用高纯度的去离子水对样品进行 3 min 的冲洗,以防止上一步骤在硅片表面残留的溶液对后续步骤造成干扰。绒面金字塔形貌采用德国 Zeiss 公司生产的型号为 SUPRA55VP 的扫描电子显微镜(SEM)进行观察,硅基异质结太阳电池的量子效率采用美国 PV Measurements 公司生产的型号为 QEX10 的光谱响应/量子效率测量系统进行测试,电流-电压(*I-V*)曲线采用日本 WACOM 公司生产的型号为 WXS-156S-L2 的太阳模拟器(AM1.5, 100 mW $\cdot\text{m}^2$)进行测试。样品少子寿命的测量采用的是美国 Sinton 公司生产的型号为 WCT-120 的少子寿命测试仪中的准稳态光电导方法(QSSPC 模式),用于测量少子寿命的样品皆双面钝化,且两面 a-Si:H 的沉积条件相同。采用美国无线电公司(RCA)研发的清洗方法,利用体积分数为 1% 的 HF 酸将优化后的绒面衬底清洗后放入等离子体增强化学气相沉积设备(PECVD)中双面沉积本征非晶硅(i-a-Si:H),钝化硅片表面,正面沉积非晶 P 层(p-a-

Si:H),背面沉积非晶 N 层(n-a-Si:H),再正面热蒸发掺 Sn 的 In₂O₃ (ITO),正面蒸镀银栅电极,背面蒸铝电极。SHJ 电池的结构如图 1 所示,电池面积为 0.6 cm²。

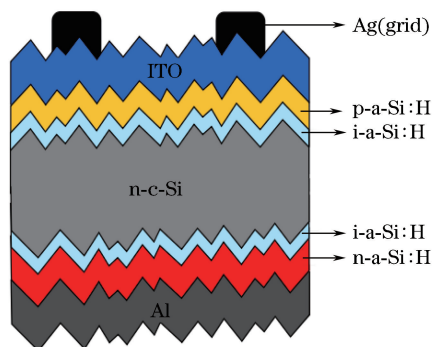


图 1 SHJ 太阳电池结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of SHJ solar cell

3 结果与讨论

3.1 CP133 化学抛光液温度对钝化与电池性能的影响

CP133 化学抛光液对硅表面进行各向同性腐蚀,即化学抛光(chemical polish, CP)时,反应方程式^[16]如下:



如(1)式所示,硝酸分子和硅原子反应生成二氧化硅、氮的氧化物和水;如(2)式所示,表面生成的二氧化硅再和氟化氢分子反应,生成硅氟酸(H₂SiF₆)和水。可以看出,第一个反应是氧化反应,硝酸是氧化剂;第二个反应是刻蚀反应,氟化氢是刻蚀剂。由于 HF-HNO₃ 混合溶液的硅腐蚀反应是自催化反应,可通过多种手段控制反应速度^[17]。通常加入缓蚀剂来降低腐蚀速度。常用的缓蚀剂是水和冰乙酸。水的加入主要是降低了 HNO₃ 的浓度,从而减小了酸对硅片的氧化能力。而冰乙酸作为缓蚀剂,它的存在可以减缓 HF 酸对硅氧化物的刻蚀速率。

图 2 给出金字塔侧面的 SEM 图。采用了 CP133 化学抛光液对前述清洗制绒后的硅片进行各向同性腐蚀,以使金字塔谷底钝化。从图 2 可以看到,金字塔谷底明显钝化,由“V”型[图 2(a)]变成了“U”型[图 2(b)]。这种形状的谷底利于非晶硅薄膜均匀沉积,但不易于薄膜外延生长^[14-15]。研究中发现,抛光液的温度对腐蚀效果有较大的影响。当抛光液的温度在 30℃ 以下时,抛光并经非晶硅

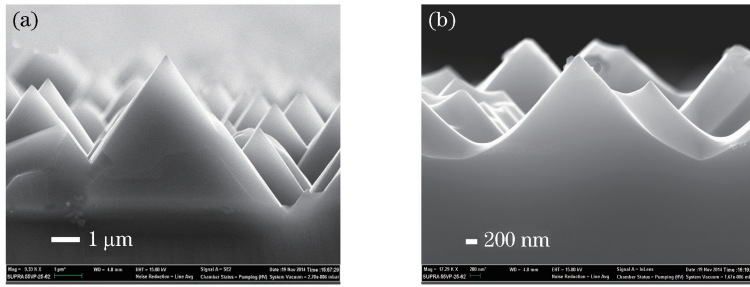


图2 金字塔侧面 SEM 图。(a)各向同性腐蚀前;(b)各向同性腐蚀后

Fig. 2 SEM images of pyramid profile. (a) Before isotropic etching; (b) after isotropic etching

钝化后(上述处理简称为处理 1),硅片少数寿命如表 1 所示,其中 V_{oc-imp} 表示暗含开路电压。

表 1 处理 1 中制绒硅片的少数寿命和相对应的 V_{oc-imp}

Table 1 Minority carrier lifetime and corresponding V_{oc-imp} of texturing silicon substrates in treatment 1

| Lifetime as-deposited / μ s | $V_{oc-imp}^{deposite} / V$ | Lifetime after annealing / μ s | V_{oc-imp}^{anneal} / V |
|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| 118 | 0.668 | 181 | 0.684 |
| 110 | 0.665 | 162 | 0.68 |

从表 1 可以看出,CP133 溶液温度在 30 °C 以下时,对制绒片的钝化效果较差,退火后少数寿命提高也较小。即抛光液基本上没有起到各向同性腐蚀的作用。温度制约了化学抛光作用的发挥。因此尝试将溶液中的氢氟酸和冰乙酸配到一起,放到一个恒温 50 °C 的水浴槽中加热 15 min,再加入硝酸(发烟硝酸常温下挥发性已经很强,故没有对其进行直接加热),迅速从水浴槽中拿出,放入制绒硅片进行抛光处理,用温度计测得的溶液温度约为 35 °C。用同样非晶硅钝化(本段所述处理简称为处理 2),效果如表 2 所示。

表 2 处理 2 中制绒硅片的少数寿命和相对应的 V_{oc-imp}

Table 2 Minority carrier lifetime and corresponding V_{oc-imp} of texturing silicon substrates in treatment 2

| Lifetime as-deposited / μ s | $V_{oc-imp}^{deposite} / V$ | Lifetime after annealing / μ s | V_{oc-imp}^{anneal} / V |
|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| 677.8 | 0.72 | 1399.86 | 0.733 |
| 495.42 | 0.712 | 1137.94 | 0.731 |

从表 2 可以看出,将溶液加热后再处理硅片,硅片的钝化效果明显改善,而且退火后提升更加明显,其数值基本与硅片的体材料少数寿命值相当,说明非晶硅/晶体硅界面没有出现外延生长。可见,温度对 CP133 溶液的腐蚀反应影响非常大,它需要一个高的起始温度才能发挥腐蚀作用。硝酸溶液采用质量分数为 98% 的发烟硝酸,这种发烟硝酸本身挥发性很强,当温度升高时其挥发性将更加剧烈,并且会

加速分解,短时间内产生大量有毒气体。这不但会影响抛光液的组分配比的稳定性,也增加了操作人员的危险。鉴于上述溶液温度已达到了很好的钝化效果,本研究未继续增加溶液的温度。

3.2 CP133 化学抛光液抛光时间对钝化及电池性能影响

根据前期实验条件的探索,当没有作化学抛光处理时,采用质量分数为 2% 的 NaOH 溶液制绒的硅片衬底制备的电池性能和质量分数为 1% 的 NaOH 溶液的制绒的电池性能差别不大。为了确定最佳的 NaOH 浓度,同时为了观察化学抛光处理对硅片表面形貌、钝化及电池性能的影响,本节中采用 CP133 化学抛光液分别对上述两种浓度的 NaOH 溶液制绒后的硅片进行了不同时间的抛光处理,并进行了测试分析。

3.2.1 抛光时间对质量分数为 2% 的 NaOH 溶液制绒硅片的钝化及电池性能影响

首先采用质量分数为 2% 的 NaOH 溶液对硅片(金字塔尺寸在 10~25 μ m)进行不同时间的抛光处理,处理时间分别为 30,40,50,60,70 s。其表面形貌 SEM 图如图 3 所示。

通过计算 SEM 图中阴影部分所示的沟壑宽度可得:腐蚀时间为 30 s 时沟壑宽度为 0.63 μ m,腐蚀时间为 40 s 时沟壑宽度为 0.66 μ m,腐蚀时间为 50 s 时沟壑宽度为 1 μ m,腐蚀时间为 60 s 时沟壑宽度为 1.1 μ m,此时金字塔已经出现明显削平迹象,如图 3(d)中圆圈内区域所示;腐蚀时间为 70 s 时沟壑宽度为 1.2 μ m,且在表面出现凹坑,如图 3(e)中圆圈内区域所示,此时沟壑比重过大。这表明随着时间的增加,金字塔底部变得越来越宽,越来越平坦化;但是当抛光处理时间过长时,沟壑占的比例过大,金字塔被明显削平,腐蚀过度,表面又有很多区域出现了较平滑的沟壑和凹坑等非(111)晶面区域。

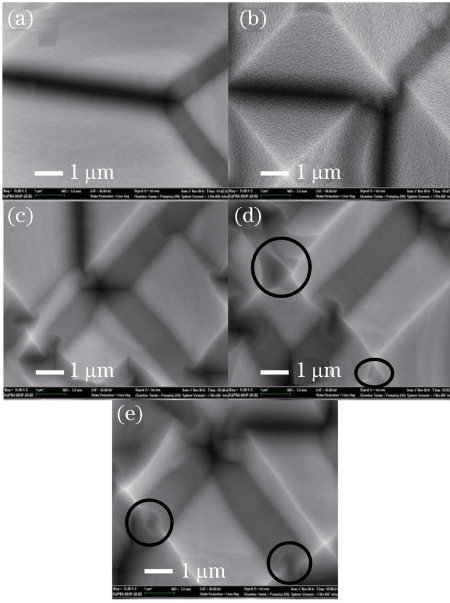


图3 质量分数为2%的NaOH溶液制绒的硅片经不同时间的CP133抛光处理后的SEM表面形貌图。

(a) 30 s; (b) 40 s; (c) 50 s; (d) 60 s; (e) 70 s

Fig. 3 SEM images of silicon substrates textured by NaOH solution with mass fraction of 2% after different CP133 polishing time treatments.

(a) 30 s; (b) 40 s; (c) 50 s; (d) 60 s; (e) 70 s

表3 CP133抛光时间对制绒硅片少数寿命及其相应的 V_{oc-imp} 的影响[$w(\text{NaOH})=2\%$]

Table 3 Effect of CP133 polishing time on minority carrier lifetime and corresponding V_{oc-imp} of texturing silicon substrates [$w(\text{NaOH})=2\%$]

| CP polishing time /s | Lifetime as-deposited / μs | $V_{oc-imp}^{\text{deposited}}/V$ | Lifetime after annealing / μs | $V_{oc-imp}^{\text{anneal}}/V$ |
|----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------------|
| 40 | 143.44 | 0.653 | 246.07 | 0.677 |
| 50 | 158.32 | 0.656 | 262.05 | 0.678 |
| 60 | 226.37 | 0.673 | 550.56 | 0.703 |

观察图4可以清晰地看出不同抛光时间的制绒硅片衬底对电池各个参数的影响,随着抛光时间的增加,电池开路电压 V_{oc} 、填充因子 F_f 逐步增加,串联电阻 R_s 逐步下降,短路电流 J_{sc-QE} 也呈现下降趋势。这是因为随着CP133化学抛光液抛光硅片表面时间的增加,金字塔谷底变得更加圆滑,外延减少,提高了薄膜质量,降低了载流子的复合,因此串联电阻下降,而它的下降会使填充因子 F_f 提升,而且抛光时间增加,金属Na残留减少,使界面复合下降,钝化效果改善(如表3所示),开路电压提升。但是时间过长,平滑部分过多,沟壑越来越大[如图3(e)所示],金字塔减反射作用减弱,导致反射增强,因此短路电流密度总体呈下降趋势。

图5所示为CP133抛光时间对电池外量子效率(E_{QE})响应的影响。可以看出,随着时间的增加,

表3为CP133抛光时间对制绒硅片少数寿命及其相应的 V_{oc-imp} 的影响。可以看出,随着抛光时间的增加,硅片少数寿命越来越高,钝化效果越来越好。因为随着抛光时间的增加,金字塔底部变得越来越平滑,在平滑的金字塔底部沉积的非晶硅薄膜不易外延生长,应力更小;而且Edwards等^[14]发现,即使是用RCA清洗工艺清洗过的NaOH溶液制绒硅片,其表面仍然残留了大量的金属Na元素,当非晶硅本征层沉积时,残留的存在会使得界面复合增加,从而导致硅片的钝化效果变差,但是当硅表面经抛光处理过后,Na元素的含量明显下降,非晶硅薄膜钝化的效果也会明显改善。很明显,化学抛光处理时间越长,Na残留会越少。但是随着抛光时间的增加,表面比较平坦的非金字塔区域越来越多,硅片的反射率越来越高,太阳能电池的短路电流密度呈下降的趋势^[18]。图4所示为不同抛光时间的制绒硅片衬底对电池性能的影响(图中 η 表征电池的转换效率)。从图4中可以看出,随着抛光时间的增加,电池的短路电流密度 J_{sc-QE} 呈不断下降的趋势(从抛光时间为30 s时的 $36.1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 下降至了抛光时间为60 s时的 $33.5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$),严重削弱了制绒减反射的效果,因此,未再做更长抛光时间的实验。

电池在各个波段的响应都有所下降。这是因为随着抛光时间的延长,表面反射增加。

3.2.2 抛光时间对质量分数为1%的NaOH溶液制绒的硅片的钝化及电池性能影响

由3.2.1节可以看出,采用质量分数为2%的NaOH溶液制绒的硅片(金字塔尺寸在 $10\sim 25 \mu\text{m}$)时的电池性能并不理想,尤其是电流下降过大时,抛光明显抵消了制绒的减反效果。相关的报道中都是使用 $10 \mu\text{m}$ 左右的金字塔尺寸的制绒硅片作钝化及电池制备,效果较好^[14,19],因此需对更小的金字塔的尺寸的制绒硅衬底进行同样的实验研究。

对采用质量分数为1%的NaOH溶液制绒的硅片(金字塔尺寸在 $2\sim 10 \mu\text{m}$)进行不同时间的抛光处理,处理时间分别为20,30,40 s。其表面形貌SEM图如图6所示。通过计算SEM图中阴影部分所示的

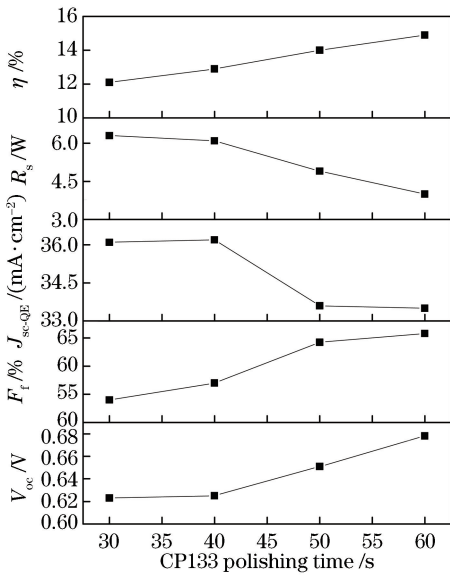


图4 太阳能电池性能随化学抛光时间的变化 $[\tau(\text{NaOH})=2\%]$
Fig. 4 Performance of solar cells as a function of chemical polishing time $[\tau(\text{NaOH})=2\%]$

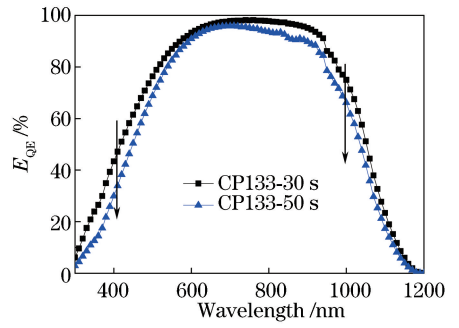


图5 CP133 抛光时间对太阳能电池外量子效率 (E_{QE}) 响应的影响 $[\tau(\text{NaOH})=2\%]$
Fig. 5 Effect of CP133 polishing time on external quantum efficiency (E_{QE}) of solar cells $[\tau(\text{NaOH})=2\%]$

沟壑宽度可得:腐蚀时间为 20,30,40 s 时沟壑宽度分别为 0.73,0.80,0.92 μm 。这表明随着时间的增加,金字塔底部变得越来越宽,越来越平坦化,但是当时间过长时,沟壑占的比例过大,腐蚀过度,表面又有很多区域出现了更宽的沟壑等非(111)晶面区域。

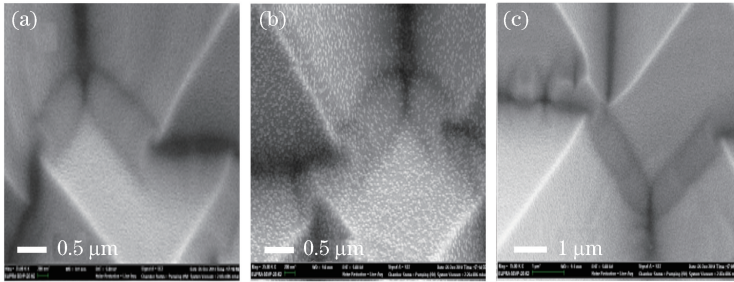


图6 质量分数为1%的 NaOH 溶液制绒的硅片经不同时间的平滑处理后的 SEM 表面形貌图。(a) 20 s;(b) 30 s;(c) 40 s
Fig. 6 SEM images of silicon substrates textured by NaOH solution with mass fraction of 1% after different polishing time treatments. (a) 20 s; (b) 30 s; (c) 40 s

表4 为由不同 CP133 抛光时间处理后又在其上沉积了 p,i,n 层(上述处理简称为处理 3)的制绒硅片的少数载流子寿命(简称少子寿命)及相应的 V_{oc-imp} 。

表4 处理 3 中制绒硅片的少子寿命及相应的 V_{oc-imp}
 $[\tau(\text{NaOH})=1\%]$

Table 4 Minority carrier lifetime and corresponding V_{oc-imp} of texturing silicon substrates in treatment 3 $[\tau(\text{NaOH})=1\%]$

| CP polishing time /s | Lifetime after annealing / μs | V_{oc-imp}^{anneal} /V |
|----------------------|--|--------------------------|
| 20 | 83.23 | 0.643 |
| 30 | 238.57 | 0.676 |
| 40 | 116.29 | 0.648 |
| 50 | 53.17 | 0.626 |

从表4可以看出,随着抛光时间的增加,成为器件的硅片的少子寿命呈现先上升后下降的趋势。这是因为随着腐蚀时间的增加,金字塔谷底更加平滑,

外延减少,钝化效果提升,成膜更加均匀;但是随着腐蚀时间的进一步延长,沟壑所占面积增加,而相比于(111)晶面来说,平坦的沟壑处表面因与未腐蚀前的硅片表面更加平行而使得所处表面中的(100)晶面比重更大,而(100)晶面相比于(111)晶面悬挂键密度更高,更难以钝化,而且由于金字塔偏小导致沟壑的数量密度比质量分数为2%的 NaOH 溶液制绒的硅片的沟壑数量密度要高,所以沟壑在整个硅片中所占比重会明显增加,以上多种因素的共同作用下,钝化效果变差。

为了清晰地观察不同化学抛光时间的制绒硅片衬底对电池性能的影响,绘制了电池参数随抛光时间的变化,如图7所示。

由图7可以看出,随着抛光时间的增加,电池开路电压先增加后下降,填充因子 F_f 逐步增加,串联电阻逐步下降,短路电流呈下降趋势,效率呈现先增

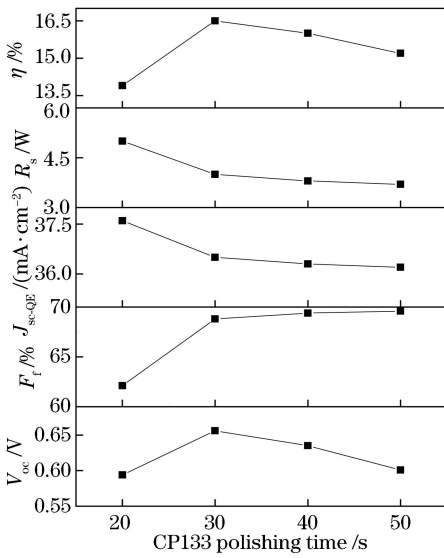


图7 太阳能电池性能随抛光时间的变化 [$w(\text{NaOH})=1\%$]

Fig. 7 Performance of solar cells as a function of polishing time [$w(\text{NaOH})=1\%$]

加后下降的趋势。对于开路电压的变化趋势,由前述对图6及表4的分析可知,随着CP133化学抛光液抛光硅片表面时间的增加,金字塔谷底变得更加圆滑、宽阔,外延减少,生长的薄膜更加均匀,a-Si:H/c-Si界面钝化效果得到提升,使得开路电压提升,而随着抛光时间的进一步增加。由于多缺陷态的沟壑所占面积过大导致a-Si:H/c-Si界面钝化效果下降,从而导致开路电压下降。对于串联电阻 R_s 来说,随着抛光时间的增加,金字塔谷底变得更加圆滑,外延减少,减少了本征和掺杂的非晶硅薄膜的缺陷态密度,提高了薄膜质量和均匀性,因此串联电阻 R_s 下降,而它的下降可提升填充因子 F_f 。对于电流来说,由于随着抛光时间的增加,平滑部分越来越多,沟壑越来越大(如图6所示),减反射的金字塔比重也就越来越小,导致反射增强,因此短路电流密度总体呈下降趋势。

3.2.3 两种浓度的NaOH溶液制绒后太阳能电池性能的比较

表5所示为不同NaOH浓度制备的两种制绒衬底上的SHJ电池的最佳性能参数。可以看出,用

质量分数为1%的NaOH溶液制绒加化学抛光的硅衬底(金字塔尺寸在 $2\sim 10\ \mu\text{m}$)所得的电池最佳效率大于用质量分数为2%的NaOH溶液(金字塔尺寸在 $10\sim 25\ \mu\text{m}$)的。用质量分数为2%的NaOH溶液制绒加化学抛光的硅衬底电池的短路电流密度只有 $33.5\ \text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,与小尺寸金字塔衬底的电池的最佳结果 $36.5\ \text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 相比,其短路电流密度整整下降了 $3\ \text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。究其原因有二。第一,用质量分数为2%的NaOH制绒溶液对硅原子腐蚀速率较高,硅片表面金字塔成核大于生长,得到的金字塔尺寸较大,密度较小,但由于其生长较快导致相互挤压,最终得到的具有完整四面体结构的金字塔数量较少[如图8(a)所示],这无疑不利于入射光的二次反射和反射率的降低,而用质量分数为1%的NaOH溶液腐蚀得到的制绒硅片表面金字塔尺寸较小,密度大,具有完整四面体结构的金字塔数量较多,而且整体上呈现大的金字塔之间分布着小金字塔的表面形貌[如图8(b)所示],有利于光的多次反射^[20-21],因而反射率更低。第二,用质量分数为2%的NaOH溶液制绒的硅片达到最佳电池效率所需的抛光时间更长,导致表面入射光反射率较高^[14,18]。图9所示为表5中两个电池外量子效率(E_{QE})的对比图,可以明显观察到,用质量分数为1%的NaOH溶液制绒的电池光谱响应更好,再次表明用小尺寸金字塔衬底更利于电池对入射光的吸收,从而更有效地提升短路电流密度。虽然大尺寸金字塔衬底的电池开路电压为 $0.678\ \text{V}$,与小尺寸金字塔衬底电池的开路电压 $0.656\ \text{V}$ 相比高 $22\ \text{mV}$,但其需要更长的抛光时间,导致沟壑过宽,金字塔已经明显出现削平迹象[如图3(d)所示],影响了后续的薄膜沉积,使得最终的电池的填充因子不高,只有 65.8% ,与小尺寸金字塔衬底的电池的结果 68.8% 相比,低了3个百分点。最终,用质量分数为2%的NaOH溶液(金字塔尺寸在 $10\sim 25\ \mu\text{m}$)的制绒加化学抛光的硅衬底所得的电池效率 14.9% ,低于用质量分数为1%的NaOH溶液(金字塔尺寸在 $2\sim 10\ \mu\text{m}$)制绒加化学抛光的硅衬底所得的电池效率 16.5% 。

表5 不同浓度NaOH溶液制绒的衬底上的SHJ电池的最佳性能参数

Table 5 Optimal performance parameters of SHJ solar cells for textured substrates prepared at different concentrations of NaOH solutions

| Concentration of NaOH / % | CP polishing time / s | $V_{\text{oc}}^{\text{smoothing}} / \text{V}$ | $F_f / \%$ | $\eta / \%$ | $J_{\text{sc-QE}} / (\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$ |
|---------------------------|-----------------------|---|------------|-------------|---|
| 1 | 30 | 0.656 | 68.8 | 16.5 | 36.5 |
| 2 | 60 | 0.678 | 65.8 | 14.9 | 33.5 |

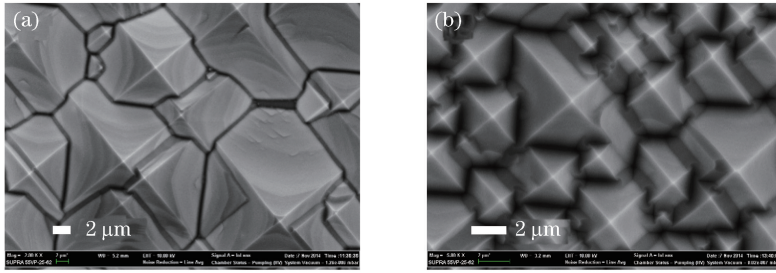


图 8 经 30 s CP133 抛光处理后不同浓度 NaOH 制绒的硅片 SEM 表面形貌图。(a) 2%;(b) 1%

Fig. 8 SEM images of silicon substrates textured by NaOH solutions of different concentrations after 30 s CP133 polishing treatment. (a) 2%; (b) 1%

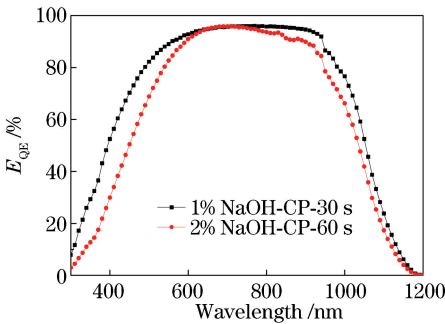


图 9 具有最佳转换效率的电池的 E_{QE} 曲线

Fig. 9 E_{QE} curves for cells with optimal conversion efficiency

4 结 论

采用 CP133 化学抛光液对制绒硅片进行表面制绒后处理,研究表明,抛光溶液温度低于 30 °C 时不能发挥腐蚀抛光作用,将溶液的起始温度提高到 35 °C 时,抛光效果较好。为研究化学抛光对硅片表面形貌、钝化特性及电池性能的影响,确定最佳 NaOH 浓度,分别对两种不同浓度 NaOH 溶液制绒的硅片进行化学抛光处理实验。结果表明,采用质量分数为 1% 的 NaOH 溶液制绒后再经过 30 s 化学抛光处理的硅衬底更适用于硅基异质结电池。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Liu J J, Yao Y, Xiao S Q, *et al.* Review of status developments of high-efficiency crystalline silicon solar cells [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(12): 123001.
- [3] Battaglia C, Cuevas A, de Wolf S. High-efficiency crystalline silicon solar cells: Status and perspectives [J]. *Energy & Environmental Science*, 2016, 9(5): 1552-1576.
- [4] Wolf D, Geissbuehler J, Loper P, *et al.* High-efficiency silicon heterojunction solar cells: Status and perspectives [J]. *Green*, 2015, 2(1): 7-24.
- [5] Masuko K, Shigematsu M, Hashiguchi T, *et al.* Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(6): 1433-1435.
- [6] Baker-Finch S C, McIntosh K R. Reflection of normally incident light from silicon solar cells with pyramidal texture [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, 19(4): 406-416.
- [7] Zhou T, Lu X D, Zhang M, *et al.* Crystalline silicon solar-cell development status and trends [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 030002. 周涛, 陆晓东, 张明, 等. 晶硅太阳能电池发展状况及趋势 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 030002.
- [8] Qiu M B, Huang Y H, Liu Z D, *et al.* Numerical study on effect of silicon texture structure on reflectance of light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2394-2399. 邱明波, 黄因慧, 刘志东, 等. 硅片绒面形貌影响光线反射的数值研究 [J]. *光学学报*, 2008, 28(12): 2394-2399.
- [9] Wang K X, Feng S M, Xu H T, *et al.* Relation between the multicrystalline silicon surface structure and the pit-trap effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0324001. 王坤霞, 冯仕猛, 徐华天, 等. 多晶硅不同晶面陷阱坑形貌与陷光效应的关系 [J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0324001.
- [10] Wang L G, Zhao Z Y, Zhang X D, *et al.*

- Optimization of light trapping structure on textured silicon substrate for heterojunction solar cells [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0216001.
- 王利果, 赵振越, 张晓丹, 等. 异质结太阳能电池硅衬底绒面陷光结构的优化 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0216001.
- [11] Wang T, Huang H B, Sun X L, *et al.* Preparation of bi-facial solar cell with heavy-doped c-Si back surface field and a-Si: H/c-Si rear junction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 081602.
- 王涛, 黄海宾, 孙喜莲, 等. 重掺杂 c-Si 背场 a-Si: H/c-Si 背结双面太阳能电池初步实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 081602.
- [12] Olibet S, Monachon C, Hessler-Wyser A, *et al.* Textured silicon heterojunction solar cells with over 700 mV open circuit voltage studied by TEM [C] // European Photovoltaic Solar Energy Conference, September 1-5, Valencia, Spain. [S. l.: s. n.], 2008: 1678-1673.
- [13] Guo W W, Zhang L P, Bao J, *et al.* Analysis of amorphous silicon passivation layer in heterojunction solar cells by spectroscopic ellipsometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0631002.
- 郭万武, 张丽平, 包健, 等. 异质结太阳能电池中非晶钝化层的分光椭偏分析 [J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0631002.
- [14] Edwards M, Bowden S, Das U, *et al.* Effect of texturing and surface preparation on lifetime and cell performance in heterojunction silicon solar cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92(11): 1373-1377.
- [15] Angermann H, Korte L, Rappich J, *et al.* Optimisation of electronic interface properties of a-Si: H/c-Si hetero-junction solar cells by wet-chemical surface pre-treatment [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(20): 6775-6781.
- [16] Shimura F. *Semiconductor silicon crystal technology* [M]. San Diego: Academic Press, 1989: 184-186.
- [17] Hui W C. How to prevent a runaway chemical reaction in the isotropic etching of silicon with HF/HNO₃/CH₃COOH or HNA solution [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5276: 270-280.
- [18] Zhao Z Y, Zhang X D, Wang F Y, *et al.* Modification of surface morphology of a textured silicon substrate and its application in heterojunction solar cells [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(13): 136802.
- 赵振越, 张晓丹, 王奉友, 等. 硅异质结电池衬底形貌的修饰及其在电池中的应用研究 [J]. *物理学报*, 2014, 63(13): 136802.
- [19] Fesquet L, Olibet S, Damon-Lacoste J, *et al.* Modification of textured silicon wafer surface morphology for fabrication of heterojunction solar cell with open circuit voltage over 700 mV [C] // IEEE Photovoltaic Specialists Conference, June 7-12, 2009, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE, 2009: 754-758.
- [20] Lien S Y, Yang C H, Hsu C H, *et al.* Optimization of textured structure on crystalline silicon wafer for heterojunction solar cell [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2012, 133(1): 63-68.
- [21] Chen Y S, Wang H Y, Yang S E. Application of light trapping in the crystal silicon solar cell [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(5): 56-58.
- 陈永生, 王海燕, 杨仕娥. 光陷阱在晶硅太阳能电池中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(5): 56-58.