

双层 SiN_x膜对单晶硅太阳能电池性能的影响及 XPS 表征

马新尖¹ 林涛²

¹拉萨师范高等专科学校信息技术系, 西藏 拉萨 850007

²西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 采用X射线光电子能谱(XPS)分析了单层和双层 SiN_x膜中的化学键、N/Si比及 Si、N、C、O原子百分比,进一步验证了等离子体增强化学气相沉积法沉积单层和双层 SiN_x膜对单晶硅太阳能电池电学性能的影响。XPS、反射率及少子寿命的分析表明, NH₃和 SiH₄在单晶硅表面生成了含有 H 的 SiN_x薄膜, 双层 SiN_x外层膜的 N/Si 比略高于单层膜, 起到了更好的减反射效果, 内层膜比单层膜富 Si, 起到了更好的钝化效果。电学测试结果表明, 相比单层 SiN_x膜单晶硅太阳能电池, 双层 SiN_x膜单晶硅太阳能电池开路电压提高了 2 mV、短路电流提高了 47 mA、转化效率提高了 0.17%。

关键词 光电子学; 单晶硅太阳能电池; 双层 SiN_x膜; X射线光电子能谱; 键能; 转换效率

中图分类号 TN36

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.061608

Effect of Double-Layer SiN_x Film on Mono-Crystalline Silicon Solar Cells and XPS Characterization

Ma Xinjian¹ Lin Tao²

¹Information Technology Department, Lhasa Normal College, Lhasa, Tibet 850007, China

²College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Chemical bond in single-layer and double-layer SiN_x film, N/Si ratio and atomic percentage of Si、N、C、O are analyzed by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) in this paper. The impact of single-layer and double-layer SiN_x film deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) on mono-crystalline silicon solar cells electrical characteristic is verified. Analyses of XPS, reflectivity and minority carrier lifetime show that the film of SiN_x with H atoms is generated on the mono-crystalline surface through NH₃ and SiH₄. The N/Si ratio of outer film of double-layer SiN_x is slightly higher than that of single-layer SiN_x, which play the better effect on anti-reflection. And the internal film had a better passivation effect than single-layer film because of richer Si. The electrical characteristic test shows that, comparing with single-layer SiN_x film solar cell, open circuit voltage, short circuit current and photoelectric conversion efficiency of double-layer SiN_x film solar cell improve by 2 mV, 47 mA and 0.17% respectively.

Key words optoelectronics; mono-crystalline silicon solar cell; double-layer SiN_x film; XPS; bond energy; conversion efficiency

OCIS codes 160.6000; 160.6030; 220.4840; 350.6050

1 引言

在太阳能电池减反射膜的研究中,减反射膜出现过 SiO₂、TiO₂、SiN_x等多种材料,由于 SiN_x薄膜具有生长温度低、结构致密、对体积较小的金属离子具有很好的阻挡作用,通过调节气体原料 NH₃和 SiH₄流量比能够调节 SiN_x膜折射率的大小^[1],以致达到更好的减反射和钝化效果,因此在大规模生产中得到了广泛的应用。

单层 SiN_x膜由于不能起到很好地钝化效果而逐渐被多层减反射膜所取代。2001年赵建华等^[2-3]通过定域扩散,采用 MgF₂/ZnS 材料制作双层减反射膜进一步降低了表面反射,制作了实验室效率 24.7% 世界最高记录的 PERL 电池;2010年韩培育等^[4]通过等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)制作了 SiO₂/SiN_x叠层减反射膜,来提高太阳能电池的光电转化效率;以上双层减反射膜在提高太阳能电池光电转化效率方面取得了一定的成效,但由于制备成本高等原因无法大规模推广使用。SiN_x膜具有一定的优越性,近年来,相关学者从

收稿日期: 2015-01-27; 收到修改稿日期: 2015-02-14; 网络出版日期: 2015-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61106043)

作者简介: 马新尖(1985—),女,硕士,助教,主要从事半导体光伏电池和器件等方面的研究。E-mail: 932594765@qq.com

理论上对双层 SiN_x 膜的短波效应以及与单层 SiN_x 膜太阳能电池电学特性的对比分析进行了研究^[5-7];2009年德国康茨坦大学的学者发现在 PECVD 沉积 SiN_x 膜的过程中,通过调节气体流量比可制备出比单层 SiN_x 膜具有更好的减反射和钝化效果的双层膜^[1];文献[8]中报道采用双层 SiN_x 膜的单晶硅太阳能电池,其绝对光电转换效率提高了 0.2%,在大规模生产中具有很好的推广前景;至此,自 2011 至 2014 年关于双层 SiN_x 膜及其制备方法的发明专利相继而出^[9-12]。虽然对于双层 SiN_x 膜的研究层出不穷,但通过 X 射线光电子能谱(XPS)对单层及双层 SiN_x 膜原子比等方面的研究较少。

本文通过 PECVD 沉积单层和双层 SiN_x 膜,对单层及双层 SiN_x 膜进行 XPS 及电学特性测试分析,进一步研究其减反射效果及钝化效果对单晶硅太阳能电池性能的影响,对大规模生产单晶硅太阳能电池具有一定的意义。

2 实验

2.1 电池制作工艺

实验选用 p 型衬底为 125 mm×125 mm,表面积为 154.828 cm²,厚度约为 180 μm,电阻率为 1~3 Ω·cm 的单晶硅片,通过碱性溶液制绒,增强硅片表面的陷光作用;通过磷扩散形成 n 型发射结;采用等离子体刻蚀技术去掉边缘因扩散形成的 pn 结,以防短路;采用 HF 酸去掉磷硅玻璃;采用 PECVD 工艺制作单层和双层 SiN_x 减反射膜;最后通过丝网印刷制作背电极、Al 背场及正面栅电极,经烧结形成良好的欧姆接触。

实验中采用椭圆偏振仪测试太阳能电池减反射膜的厚度及折射率;使用 SEMILAB 的微波光电导衰减法(μ -PCD)对镀膜前后的半成品电池片进行少子寿命的测试;通过标准 8 度角积分反射率测试仪对反射率进行测试;采用太阳能电池测试仪对太阳能电池电学特性进行测试;通过使用美国 PE 公司的 PHI-5400 型 X 射线光电子能谱仪对单晶硅太阳能电池单层及双层 SiN_x 减反射膜样品进行 XPS 测试并采集数据。

2.2 工艺实验方案

表 1 给出了两组实验方案,其中 a 组和 b 组分别为单层和双层 SiN_x 减反射膜 PECVD 制备工艺。a 组采用 NH_3/SiH_4 比为 4000:200、时间为 645 s 的工艺制作了平均膜厚约为 80 nm、折射率约为 2.05 的单层 SiN_x 膜,b 组 SiN_x 膜分为内外两层,外层膜采用 NH_3/SiH_4 比为 4020:380、时间为 395 s 的工艺,内层膜采用 NH_3/SiH_4 比为 3700:700、时间为 245 s 的工艺,制作了平均膜厚约为 80 nm、折射率约为 2.05 的双层 SiN_x 膜。a、b 两组除了气体流量比和沉积时间不同外,PECVD 镀膜均在压强为 170 Pa、功率为 3000 W、炉管 5 个温区温度均为 450 °C 的工艺条件下实现,其余太阳能电池制备工艺均采用标准工艺。

表 1 太阳能电池实验方案

Table1 Scheme of experiment of solar cell

Group	$(\text{NH}_3/\text{SiH}_4)_{\text{single-layer}}$		t/s		d/nm		Refractive
	$(\text{NH}_3/\text{SiH}_4)_{\text{outer-film}}$	$(\text{NH}_3/\text{SiH}_4)_{\text{internal-film}}$	$t_{\text{outer-film}}/s$	$t_{\text{internal-film}}/s$	$d_{\text{outer-film}}/nm$	$d_{\text{internal-film}}/nm$	
Single-layer	4200:420		645		80		2.05
Double-layer	4020:380	3700:700	395	245	50	30	2.05

3 结果与讨论

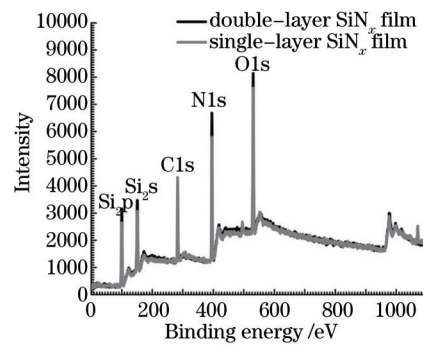
3.1 SiN_x 膜的 XPS 表征

由于 XPS 测试过程中会给样品表面带来一定的(正)电荷积累,导致测试结果向高结合能方向偏移,因此,为了避免因结合能偏移而带来的测试误差,在测试中采用结合能为 284.8 eV 的 C1s 进行校准^[13]。

图 1 给出了校准后单层和双层 SiN_x 膜的 XPS 全谱。从图中可以看出,薄膜除了 Si 和 N 元素之外,测试结果还有 C、O 元素的存在。其中 C 元素主要源于样品在大气中吸附的有机物污染、CO₂ 污染以及测试系统中的有机物污染所致;O 元素一般源于吸附空气中的 O 污染所致。

为了便于定量分析 SiN_x 膜中 Si、N 元素的化学状态和化学配比,以及 C、O 元素是否对 SiN_x 膜产生影响,完成对 SiN_x 膜的全谱测试后,对 SiN_x 膜中 Si、N、C、O 4 种元素进行了 XPS 高分辨率扫描,并扣除 Shirley 背底进行解谱,结果如图 2 所示。

由 Si2p 的解谱图可以看出,单层 SiN_x 膜 XPS 测试精细谱分别被分解为 100.02 eV 和 101.39 eV 两个高斯峰,双层 SiN_x 膜 XPS 测试精细谱同样被分解为 99.76 eV 和 101 eV 两个高斯峰,认为单层及双层 SiN_x 膜中 Si2p_{1/2} 被分解的 100.02 eV 和 99.76 eV 比较符合结合能为 99.9 eV 的 Si-Si 键^[14]以及结合能为 99.65 eV 的 Si-

图1 SiN_x膜的XPS全谱Fig.1 XPS full spectrum of SiN_x film

H键^[15],由于Si-Si键键能为222 kJ/mol^[16],Si-H键键能为318 kJ/mol^[16],键能越大,化学键越稳定,所以SiH₄在PECVD腔室分解时Si-Si键的成键几率较低。单层及双层SiN_x膜中Si2p_{3/2}被分解的101.39 eV和101 eV与101.5 eV的Si-N键符合^[15]。

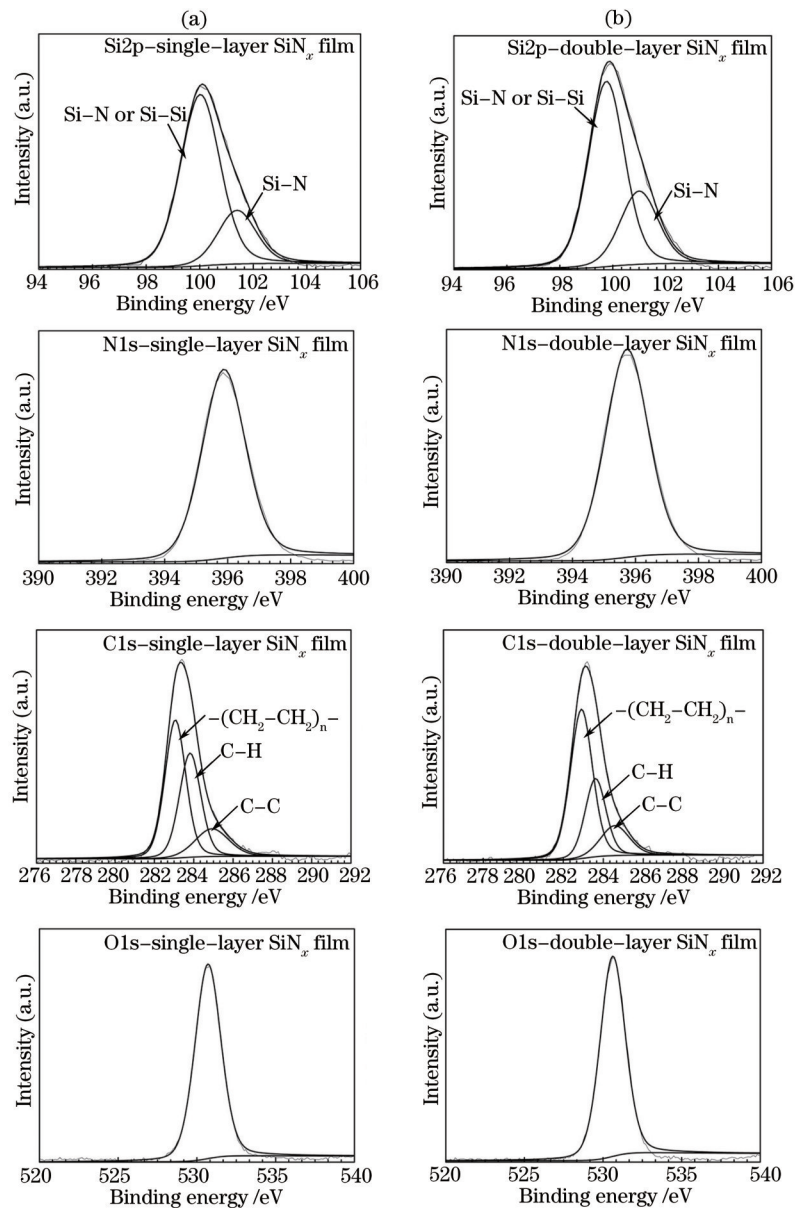
图2 (a) 单层及(b)双层SiN_x膜表面Si、N、C、O的XPS高斯解谱

Fig.2 XPS curves fitting of Si、N、C、O on the surface of (a) single-layer and (b) double-layer silicon nitride film

单层及双层 SiN_x 膜 XPS 测试中 C1s 均被分解为三个高斯峰, 分别来自有机物污染的 $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n-$ 键, 以及来自空气吸附 CO_2 、水分子等污染的 C-H 键和 C-C 键;

单层及双层 SiN_x 膜中 N1s 和 O1s 均为一个高斯峰, 说明其成键较简单。N1s 的结合能均在 396 eV 附近, 比标准结合能 398 eV 减少了 2 eV, 结合能降低, 一方面说明 N 在 SiN_x 膜中以负的化学价态存在; 另一方面说明 N 在 SiN_x 薄膜中与比其电负性低的原子成键, N-H、N-Si 及 N-C 键。由于 C1s 谱中无法分解出 285.7 eV^[17] 的 C-N 键, 可以说明材料中的 N 与 C 未成键。O1s 结合能均约为 530.5 eV, 主要由空气中 O 的污染所致。

由上述分析可知, NH_3 与 SiH_4 在 PECVD 腔室中确实生成了含有 Si-H、N-H 及 N-Si 键的 SiN_x 膜。根据解谱的结果, 结合 XPS 手册中的各个元素的灵敏度因子, 可计算出单层及双层 SiN_x 膜中各个元素的比值及原子百分比含量。各个元素的比值^[18]为

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{I_1/S_1}{I_2/S_2}, \quad (1)$$

式中 n_1 和 n_2 分别为在每立方厘米体积样品中元素 1 和元素 2 的原子数目, I_1 和 I_2 分别为元素 1 和元素 2 的光电子峰的面积强度或谱线强度, S_1 和 S_2 为元素的灵敏度因子。

各元素的原子百分比含量^[18]为

$$c_x = \frac{n_x}{\sum_i n_i} = \frac{I_x/S_x}{\sum_i I_i/S_i}, \quad (2)$$

式中 n_x 为在每立方厘米体积样品中某元素的原子数目, I_x 为光电子峰的面积强度或谱线强度, S_x 为元素的灵敏度因子, C_x 为原子浓度。

(1)式可计算单层和双层 SiN_x 膜中 Si 和 N 的原子比例, (2)式可计算单层和双层 SiN_x 膜中 Si、N、C、O 原子百分比。计算结果如表 2 所示。

表 2 单层及双层 SiN_x 膜表面 Si、N、C、O 原子百分比及 N/Si 比

Table 2 Atomic percentages of Si、N、C、O and N/Si ratio on the surface of single-layer and double-layer silicon nitride film

	Si	N	C	O	N/Si
Single-layer SiN_x film	26.03%	26.57%	24.64%	22.76%	1.020
Double-layer SiN_x film	27.54%	28.19%	22.45%	21.83%	1.024

表 2 给出了各原子及主要化学键在单层及双层 SiN_x 膜上表面中的百分比。由表 2 可知, 相比吸附有 C 和 O 的单层膜, Si 原子和 N 原子在吸附有 C 和 O 的外层膜中的含量略高。外层膜的 N/Si 比略高于单层膜, 说明双层 SiN_x 膜的外层膜富 N。 $(\text{NH}_3/\text{SiH}_4)_{\text{outer-film}} > (\text{NH}_3/\text{SiH}_4)_{\text{single-layer}} > (\text{NH}_3/\text{SiH}_4)_{\text{internal}}$, 可知 NH_3/SiH_4 气体流量越大薄膜含有的 N 越多, SiN_x 外层膜折射率与 Si 基底折射率相差越大; 反之, 薄膜富 Si, SiN_x 膜的晶格结构与基底 Si 的结构更加匹配, SiN_x -Si 界面的界面态数量减少, 有效复合中心数量减少, 利于表面钝化。

3.2 双层 SiN_x 膜对反射率的影响

图 3 给出了单层及双层 SiN_x 减反射膜太阳能电池样品反射率测试曲线。由图可知, 当波长在 300~650 nm 时, 单层及双层 SiN_x 膜太阳能电池样品平均反射率分别为 8.83% 和 7.03%, 双层 SiN_x 膜太阳能电池样品减反射效果明显优于单层 SiN_x 膜太阳能电池样品减反射效果; 当波长在 650~1100 nm 时, 单层及双层 SiN_x 膜太阳能电池

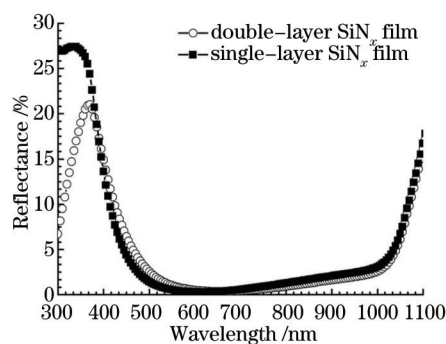


图 3 单层和双层 SiN_x 膜太阳能电池反射率曲线

Fig.3 Reflectivity curves of single-layer and double-layer SiN_x film solar cell

样品平均反射率分别为3.02%和2.63%,相对于单层 SiN_x 膜太阳能电池样品,双层 SiN_x 膜仍然具有较好的减反射效果;由此可知,双层 SiN_x 膜单晶硅太阳能电池在整个光谱响应范围都具有比单层 SiN_x 膜太阳能电池更好的减反射特性。由3.1节的分析可知,双层 SiN_x 膜太阳能电池样品减反射效果好是因为双层 SiN_x 外层膜富N,外层膜折射率与Si基底折射率相差较大的作用。

3.3 双层 SiN_x 膜对少子寿命的影响

为了能够准确地对比单层和双层 SiN_x 膜对单晶硅太阳能电池的钝化效果,采用同一个厂家购买的单晶硅片作为实验对象,单层及双层 SiN_x 膜沉积前Si片少子寿命分别为 $3.5\ \mu\text{s}$ 和 $3.4\ \mu\text{s}$,可见,沉积前Si片少子寿命无明显区别。沉积后的少子寿命分布如图4(a)、(b)所示。由图2可知,单晶硅太阳能电池在沉积单层及双层 SiN_x 膜后平均少子寿命分别为 $4.164\ \mu\text{s}$ 和 $4.345\ \mu\text{s}$,相比沉积前均有所增加;单层及双层 SiN_x 膜太阳能电池样品少子寿命最大值分别为 $13.565\ \mu\text{s}$ 和 $17.939\ \mu\text{s}$,双层膜太阳能电池样品少子寿命最大值高出单层膜太阳能电池样品 $4.374\ \mu\text{s}$;因此可知,沉积双层 SiN_x 膜太阳能电池比沉积单层 SiN_x 膜太阳能电池具有更好的钝化效果。由3.1节分析可知,双层 SiN_x 膜太阳能电池样品钝化效果好是由于双层 SiN_x 内层膜富Si,内层膜的晶格结构与Si基底的结构越匹配, SiN_x -Si界面的界面态数量越少,有效复合中心数量越少。

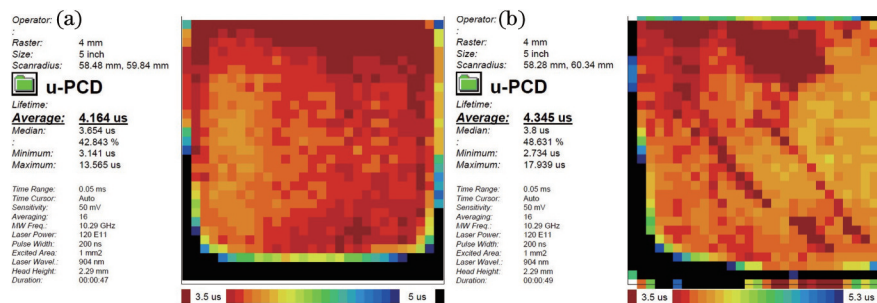


图4 (a)单层和(b)双层 SiN_x 膜太阳能电池样品少子寿命分布

Fig.4 Minority carrier lifetime distribution of (a) single-layer and (b) double-layer SiN_x film solar cell samples

3.4 双层 SiN_x 膜对太阳能电池电学特性的影响

表3给出了单层及双层 SiN_x 膜单晶硅太阳能电池电学特性测试结果。由测试结果可知,相比沉积单层 SiN_x 膜的单晶硅太阳能电池,沉积双层 SiN_x 膜的单晶硅太阳能电池因同时具有更好减反射和钝化效果,其短路电流提高了 $47\ \text{mA}$ 、开路电压提高了 $2\ \text{mV}$ 、转化效率提高了 0.17% 。由上述分析可知,相比单层 SiN_x 膜,双层 SiN_x 外层膜富N是增强其减反射效果的主要原因,减反射效果越好,透过薄膜进入Si中的光子数将越多,产生载流子的几率也就越大,利于短路电流的提高^[19]。由3.1节分析可知,一方面双层 SiN_x 内层膜富Si, SiN_x 膜的晶格结构与基底Si的结构越匹配,使得 SiN_x -Si界面的界面态数量越少,有效复合中心数量减少,利于表面钝化,开路电压的提高;另一方面,XPS的分析也表明 NH_3 与 SiH_4 在PECVD中生成了含有H的 SiN_x 膜,经过烧结H会到达Si的表面及体内,减少Si表面及体内的缺陷,同样起到减少有效复合中心数量的作用,达到钝化Si表面及体内的缺陷的目的,使得开路电压得以提高。双层 SiN_x 膜单晶硅太阳能电池填充因子略低于单层 SiN_x 膜太阳能电池,这是因为双层 SiN_x 膜单晶硅太阳能电池的并联电阻 R_{sh} 较低以及串联电阻 R_s 较高所致^[20]。

表3 单晶硅太阳能电池电学性能测试结果

Table 3 Electrical performance test results of mono-crystalline silicon solar cells

	V_{oc} / V	I_{sc} / A	$F_F / \%$	$\eta / \%$	$R_s / \text{m}\Omega$	R_{sh} / Ω
Single-layer SiN_x film solar cell	0.629	5.577	79.04	17.91%	4.66	11212.51
Double-layer SiN_x film solar cell	0.631	5.624	78.84	18.08%	5.00	857.18

4 结 论

本文采用PECVD镀膜工艺对单层及双层 SiN_x 膜单晶硅太阳能电池电学性能的影响进行了分析,采用XPS对 SiN_x 膜进行了表征。测试结果表明,双层 SiN_x 膜单晶硅太阳能电池比单层 SiN_x 膜太阳能电池开路电压提高了 $2\ \text{mV}$ 、短路电流提高了 $47\ \text{mA}$ 、转化效率提高了 0.17% 。XPS、反射率及少子寿命测试分析表明, NH_3 和 SiH_4 在单晶硅表面生成了含有H原子的 SiN_x 薄膜,双层 SiN_x 外层膜相比单层 SiN_x 膜具有较高的N/Si比,起

到了更好的减反射效果,且内层膜比单层膜富Si,起到了更好的钝化效果。

参考文献

- 1 Fan Jinxing, Shi Zhengrong, Zhang Chunguang, *et al.*. Influence of double-layer SiN_x thin film deposited by PECVD on solar cell[J]. *Advanced Semiconductor Manufacturing Technologies*, 2012, 37(3): 192-196.
金凡星, 施正荣, 张光春, 等. PECVD沉积双层SiN_x对太阳能电池性能的影响[J]. *半导体先进制造技术*, 2012, 37(3): 192-196.
- 2 O Schultz, S W Glunz, G P Willeke. Multi-crystalline silicon solar cells exceeding 20% efficiency[J]. *Progress in Photovoltaic's: Research and Applications*, 2004, 12(7): 553-558.
- 3 Shen Hui, Zeng Zuqin. *Solar photovoltaic Technology*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
沈辉, 曾祖勤. *太阳能光伏发电技术*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- 4 Han Peiyu, Ji Jingjia, Wang Zhengao, *et al.*. The study of SiO₂-SiN_x stack-layer passivation films deposited by PECVD[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2010, 31(12): 1449-1552.
韩培育, 季静佳, 王振高, 等. PECVD SiO₂/SiN_x叠层钝化膜的研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(12): 1449-1552.
- 5 Bikash Kumar, T Baskara Pandian, E Sreekiran, *et al.*. Benefit of dual layer silicon nitride anti-reflection coating[C]. *IEEE PVSC*, 2005: 1205-1209.9
- 6 J Hofstetter, C Del Cañizo, S Ponce-Alcántara, *et al.*. Optimisation of SiN_x: H anti-reflection coatings for silicon solar cells[C]. *IEEE*, 2007: 131-134.
- 7 Zoolfakar A S, Syed Othman S R, Abdullan M H, *et al.*. Characterization of silicon and dual layer anti-reflecting coating (ARC) for solar cell applications[C]. *IEEE*, 2009: 543-547.
- 8 Qu Sheng, Mao Hehuang, Han Zenghua, *et al.*. Crystalline silicon solar cells with PECVD dilayer SiN_x:H thin films[C]. *Proceedings of the 11th China Solar Photovoltaic Conference and Exhibition*, 2010: 76-80.
屈盛, 毛和璜, 韩增华, 等. 双层PECVD氮化硅膜晶硅太阳能电池[C]. 第十一届中国光伏大会暨展览会, 2010: 76-80.
- 9 宁波富星太阳能有限公司. 双层氮化硅减反射膜及其制备方法: 中国, 201410020311.4[P]. 2014-04-23.
- 10 上海超日太阳能科技股份有限公司. 一种用于太阳能电池的双层氮化硅减反射膜及其制备方法: 中国, 201110319268.8[P]. 2013-04-24.
- 11 浙江金贝能源科技有限公司. 具有双层减反射膜的太阳能电池片: 中国, 201120479332.4[P]. 2012-07-11.
- 12 宁波尤利卡太阳能科技发展有限公司. 双层氮化硅减反射膜制备方法: 中国, 201110182481.9[P]. 2011-10-19.
- 13 He Junpeng, Zhang Yueguang, Shen Weidong, *et al.*. Optical properties of Al₂O₃ thin film fabricated by atomic layer deposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 277-282.
何俊鹏, 章岳光, 沈伟东, 等. 原子层沉积制备Al₂O₃薄膜的光学性能研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 277-282.
- 14 Niu Xiaobin, Liao Yuan, Chang Chao, *et al.*. Silicon carbon nitride films grown by hot-filament chemical vapor deposition[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2004, 19(2): 397-403.
牛晓滨, 廖源, 常超, 等. 热丝CVD生长SiCN薄膜的研究[J]. *无机材料学报*, 2004, 19(2): 397-403.
- 15 NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy Database, Version 4.1 (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2012).[DB]. <http://srdata.nist.gov/xps/>. Accessed 20 January 2013.
- 16 Faculty of Beijing Normal University. *Inorganic Chemistry*[M]. Beijing: High Educational Press, 1992: 566.
北京师范大学无机化学教研室等编. *无机化学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 566.
- 17 Piao Yong, Xu Jun, Gao Peng, *et al.*. Influence of C content on chemical structure and properties of silicon carbonitride film[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2006, 26(6): 526-529.
朴勇, 徐军, 高鹏, 等. 碳含量对碳氮化硅薄膜化学结构和力学性能的影响[J]. *真空科学与技术学报*, 2006, 26(6): 526-529.
- 18 Guo Qinlin. X-ray photoelectron spectroscopy[J]. *Physics*, 2007, 36(5): 405-410.
郭沁林. X射线光电子能谱[J]. *物理*, 2007, 36(5): 405-410.
- 19 Ma Xinjian, Lin Tao. Analysis of mono-crystalline silicon solar cells electroluminescence defects and process influencing factors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 031601.
马新尖, 林涛. 单晶硅太阳能电池电致发光缺陷及工艺影响因素分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 031601.
- 20 Ma Xinjian. *Research on the Anti-Reflection Coating for Mono-Crystal Silicon Solar Cells*[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013.
马新尖. *晶硅太阳能电池减反射膜的研究*[D]. 西安: 西安理工大学, 2013.

栏目编辑: 韩峰