

三层氮化硅减反射膜在单晶硅太阳能电池中的应用

马新尖¹, 司志华¹, 杨东¹, 林涛², 冯帅臣³

¹拉萨师范高等专科学校信息技术系, 西藏 拉萨 850000;

²西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

³扬州鑫晶光伏科技有限公司, 江苏 扬州 225653

摘要 对比了具有双层和三层氮化硅减反射膜的单晶硅太阳能电池的反射率、内外量子效率、少子寿命及电学特性, 模拟了双层和三层氮化硅减反射膜的光学特性, 结果表明, 三层氮化硅减反射膜具有更好的减反射效果和输出特性。通过等离子体增强化学气相沉积(PECVD)工艺在 P 型单晶硅上分别制作了双层和三层氮化硅减反射膜, 对其减反射效果和钝化效果的分析结果表明, 与双层氮化硅减反射膜相比, 三层氮化硅减反射膜具有较小的反射率和较好的钝化效果。对具有双层和三层氮化硅减反射膜的单晶硅太阳能电池的电学测试结果表明, 具有三层氮化硅减反射膜的单晶硅太阳能电池的转换效率比具有双层氮化硅减反射膜的单晶硅太阳能电池的转换效率有所增大。

关键词 材料; 单晶硅太阳能电池; 氮化硅减反射膜; 反射率; 量子效率

中图分类号 TN36 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061602

Application of Three-Layer Silicon Nitride Antireflection Coatings in Mono-Crystalline Silicon Solar Cells

Ma Xinjian¹, Si Zhihua¹, Yang Dong¹, Lin Tao², Feng Shuaichen³

¹Information Technology Department, Lhasa Normal College, Lhasa, Tibet 850000, China;

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

³Yangzhou Xinjing Photovoltaic Technology Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225653, China

Abstract The reflectivity, internal and external quantum efficiency, minority carrier lifetime and electrical characteristics of mono-crystalline silicon solar cells with double-layer and three-layer silicon nitride antireflection coatings are compared. The optical characteristics of double-layer and three-layer silicon nitride antireflection coatings are simulated. The results show that, the three-layer silicon nitride antireflection coating has a better antireflection effect and a better output characteristic. The double-layer and three-layer silicon nitride antireflection coatings are fabricated on P-type mono-crystalline silicon by the plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) process. The analysis results of their antireflection and passivation effects show that the three-layer silicon nitride antireflection coating has a smaller reflectivity and a better passivation effect compared with the double-layer silicon nitride antireflection coating. The electrical characteristic testing results of the mono-crystalline silicon solar cells with double-layer and three-layer silicon nitride antireflection coatings show that the conversion efficiency of the mono-crystalline silicon solar cells with three-layer silicon nitride antireflection coating is relatively higher than that with double-layer silicon nitride antireflection coating.

Key words materials; mono-crystalline silicon solar cell; silicon nitride antireflection coatings; reflectivity; quantum efficiency

OCIS codes 160.6000; 160.6030; 220.4840; 350.6050

收稿日期: 2017-11-07; 收到修改稿日期: 2017-12-11

基金项目: 西藏自治区高校青年教师创新支持计划(QC2015-86)、西藏自治区自然科学基金(XZ2017ZRG-105)

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

1 引言

增加晶硅太阳能电池在光谱响应范围内的太阳光的利用率是提高晶硅太阳能电池转换效率的重要途径之一^[1]。硅棒被切割成硅片时表面存在损伤层,表面织构化只能将硅片反射率减小至 10% 左右。为能得到更小的表面反射率,可利用光学多次反射和薄膜干涉原理进一步减小硅片表面反射率^[2]。

氮化硅(SiN_x)膜可通过调节流量比来改变折射率,并具有易制作的优越性,因此得到了学者的广泛关注^[3-5]。研究表明,双层 SiN_x 膜对单晶硅和多晶硅太阳能电池的减反射及钝化效果有明显影响,且在一定程度上增大了太阳能电池转换效率。目前,双层氮化硅减反射膜单晶硅太阳能电池已基本实现工业化制作。针对三层减反射膜的相关研究也相继被报道。

杨文华等^[6]通过计算机软件对单层、双层和三层减反射薄膜参数进行了理论研究,为多层减反射膜的制备提供了理论依据。陈亮^[7]提出了一种太阳能电池表面三层减反射钝化膜,这种薄膜先在近电池表面沉积两层不同膜厚和折射率的氮化硅,再在两层氮化硅表面沉积一层二氧化硅,通过这种操作减少了电池片形成组件后的匹配差异。徐飞等^[8]通过等离子体增强化学气相沉积(PECVD)法研究了三层氮化硅减反射膜和单层氮化硅减反射膜对晶体硅的影响,结果显示,三层氮化硅减反射膜比单层氮化硅减反射膜具有更好的输出特性。孙占峰等^[9]从制作工艺角度研究了三层氮化硅减反射膜对多晶硅太阳能电池基本特性的影响。韩菲等^[10]对三层氮化硅减反射膜在晶体硅太阳能电池中的应用进行了研究,通过将三层氮化硅膜的连续沉积改为间断性沉积,提高了氮化硅膜的致密性,改善了色差问题。

本文使用 PC1D 软件模拟了具有双层和三层 SiN_x 减反射膜的太阳能电池,对反射率等光学特性进行了理论分析。通过调节 PECVD 时间和气体流量比,制作出了所需的减反射膜结构太阳能电池。最后对具有不同结构减反射膜的太阳能电池的减反射作用、钝化效果和电学输出特性进行了测试,并对比分析了双层和三层 SiN_x 膜对太阳能电池性能的影响。

2 太阳能电池模型参数和实验

2.1 电池模拟参数设置

PC1D 软件主要用于光伏电池的计算仿真,具

有较完整的半导体器件模型,便于描述半导体器件中电子空穴的传输特性,目前已成为模拟光伏器件的标准软件之一^[11]。

实验采用 PC1D 软件对双层和三层 SiN_x 减反射膜进行模拟。设定太阳能电池面积为 244.3 cm^2 ,电池厚度为 $180 \mu\text{m}$,前后表面制绒深度为 $4 \mu\text{m}$,扩散方阻为 90Ω ,少子寿命为 $23 \mu\text{s}$,前后表面复合速率为 10000 cm/s 。表 1 为 PC1D 模拟方案,其中方案 A、B、C 为双层 SiN_x 减反射膜模拟方案,方案 D、E、F 为三层 SiN_x 减反射膜模拟方案, d_1 为减反射膜第一层厚度, d_2 为减反射膜第二层厚度, d_3 为减反射膜第三层厚度。 n_1 、 n_2 、 n_3 为减反射膜对应层的折射率。按表 1 所示方案通过 PC1D 软件对具有双层和三层 SiN_x 减反射膜的太阳能电池进行模拟。

表 1 PC1D 模拟方案

Table 1 Simulation scheme of PC1D

Scheme	d_1/nm	n_1	d_2/nm	n_2	d_3/nm	n_3
A	60	2.05	15	2.25		
B	50	2.05	25	2.25		
C	40	2.05	35	2.25		
D	55	2	15	2.2	5	2.3
E	45	2	25	2.2	5	2.3
F	35	2	35	2.2	5	2.3

2.2 电池制作工艺和实验方案

2.2.1 电池制作工艺

实验选用尺寸为 $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$,表面积为 244.3 cm^2 ,厚度约为 $180 \mu\text{m}$,电阻率为 $1 \sim 3 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 P 型单晶硅片。单晶硅片先经过碱制绒、磷扩散形成 PN 结,再通过湿法刻蚀去掉边沿 PN 结和表面磷硅酸玻璃(PSG),然后采用 PECVD 方法在扩散层表面制作双层和三层 SiN_x 膜,最后经过丝网印刷及烧结制作成品电池片。

采用少子寿命测试仪对镀膜前后的半成品电池片进行少子寿命的测试,通过反射率测试仪对反射率进行测试,并采用太阳能电池测试仪对太阳能电池电学特性进行测试。

2.2.2 实验方案

表 2 给出了具有双层和三层 SiN_x 减反射膜的单晶硅太阳能电池的实验方案。设定双层 SiN_x 膜外层膜 NH_3 、 SiH_4 气体流量比为 $55:8$,时间为 420 s ;内层膜 NH_3 、 SiH_4 气体流量比为 $38:8$,时间为 240 s 。形成的双层 SiN_x 膜平均膜厚约为 75 nm ,等效折射率约为 2.1 。设定三层 SiN_x 膜外层膜 NH_3 、 SiH_4 气体流量比为 $65:8$,时间为 525 s ;中间膜 NH_3 、 SiH_4 气体流量比为 $50:9$,时间为 200 s ;内层膜 NH_3 、

SiH_4 气体流量比为 40:95, 时间为 100 s。形成的三层 SiN_x 减反射膜平均膜厚同样约为 75 nm、折射率

约为 2.1。在太阳电池制备过程中,除了 PECVD 工艺不同外,其余制备工艺均相同。

表 2 太阳电池实验方案

Table 2 Experimental scheme of solar cell

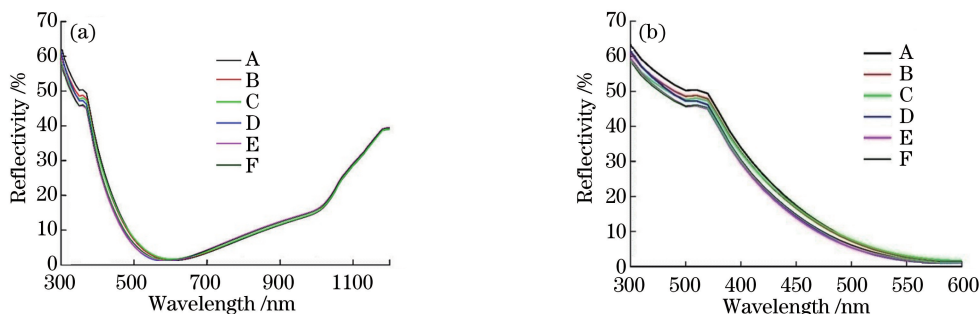
Type of solar cells	NH_3/SiH_4			Time /s		
	Outer layer	Middle layer	Internal layer	Outer layer	Middle layer	Internal layer
With double-layer SiN_x coating	55:8		38:8	420		240
With three-layer SiN_x coating	65:8	50:9	40:95	525	200	100

3 结果与讨论

3.1 反射率、量子效率及转换效率分析

图 1 给出了具有不同结构双层和三层 SiN_x 减反射膜的单晶硅太阳电池反射率在 300~1200 nm 和 300~600 nm 波长范围内的模拟结果。从图 1(a)和图 1(b)中可以看出,当波长位于 300~600 nm 范围时,C 方案双层 SiN_x 膜和 E 方案三层 SiN_x 膜的反射率较小,平均反射率分别为 24.41% 和 22.56%。具有三层 SiN_x 膜的太阳电池的减反

射效果明显优于具有双层 SiN_x 膜的太阳电池的减反射效果,具有更好的短波响应。当波长位于 600~1200 nm 范围内时,具有双层 SiN_x 膜的太阳电池的反射率略小于具有三层 SiN_x 膜的太阳电池的反射率。整体而言,在整个波长响应范围内,具有三层 SiN_x 膜的太阳电池(平均反射率为 17.92%)的减反射效果比具有双层 SiN_x 膜的太阳电池(平均反射率为 18.18%)的减反射效果好。这是由于三层 SiN_x 膜结构比双层 SiN_x 膜结构的相消干涉效果更好。

图 1 具有双层和三层 SiN_x 膜的太阳电池的反射率模拟曲线。(a) 300~1200 nm;(b) 300~600 nmFig. 1 Simulated reflectivity curves of solar cells with double-layer and three-layer SiN_x coatings.

(a) 300-1200 nm; (b) 300-600 nm

外量子效率被定义为入射光谱范围内每一个波长为 λ 的光波对外电路提供一个电子的几率^[11]。图 2 给出了具有不同结构双层和三层 SiN_x 减反射膜的单晶硅太阳电池的外量子效率模拟曲线。可以看出,在 300~600 nm 波长范围内,具有三层 SiN_x 膜的太阳电池的外量子效率明显大于具有双层 SiN_x 膜的太阳电池的外量子效率。对比各减反射膜结构的外量子效率,C 方案双层 SiN_x 膜和 E 方案三层 SiN_x 膜太阳电池具有更大的外量子效率。当波长位于 600~1200 nm 范围内时,具有双层和三层 SiN_x 膜的太阳电池的外量子效率几乎一致。就整体效果而言,具有三层 SiN_x 膜的太阳电池的外量子效率大于具有双层 SiN_x 膜的太阳电池的。根

据反射率模拟结果可知,减反效果更好的太阳能电池会有更多的入射光子进入电池内部,激发更多的电子空穴对,增大了电池为外电路提供电子的几率,外量子效率更大。由此可见,外量子效率模拟结果与反射率模拟结果一致。

图 3 给出了具有不同结构双层和三层 SiN_x 膜的太阳电池的内量子效率模拟曲线。可以看出,具有双层 SiN_x 膜的太阳电池和具有三层 SiN_x 膜的太阳电池的内量子效率无明显变化。这说明在该模拟参数下,在双层 SiN_x 膜的基础上再增加一层 SiN_x 层对单晶硅太阳电池的内量子效率影响不大。

图 4 所示为具有双层和三层 SiN_x 减反射膜的单晶硅太阳电池的转换效率模拟结果。根据反射率

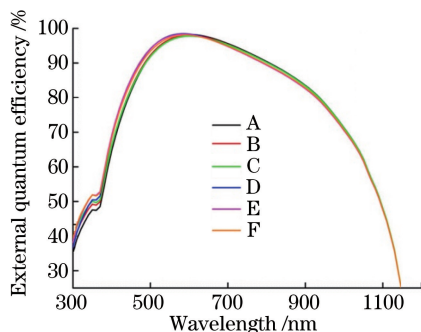


图2 具有双层和三层 SiN_x 膜的太阳能电池的外量子效率模拟曲线

Fig. 2 Simulated external quantum efficiency curves of solar cells with double-layer and three-layer SiN_x coatings

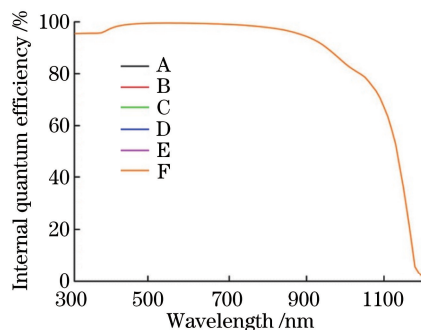


图3 具有双层和三层 SiN_x 膜的太阳能电池的内量子效率模拟曲线

Fig. 3 Simulated internal quantum efficiency curves of solar cells with double-layer and three-layer SiN_x coatings

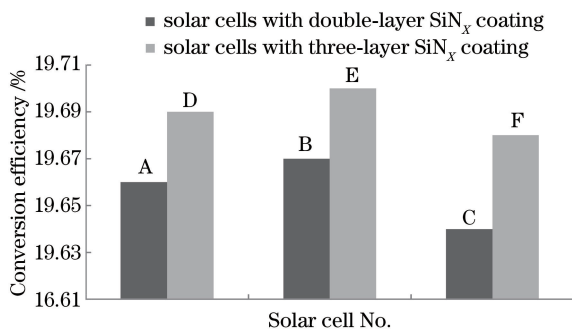


图4 具有双层和三层 SiN_x 膜的太阳能电池的转换效率模拟结果

Fig. 4 Simulated conversion efficiency results of solar cells with double-layer and three-layer SiN_x coatings

和外量子效率模拟结果可知,C方案具有双层 SiN_x 膜的太阳能电池和E方案具有三层 SiN_x 膜的太阳能电池具有较大的反射率和外量子效率。由转换效率模拟结果可知,B方案双层 SiN_x 膜和E方案三层 SiN_x 膜太阳能电池的转换效率较大,分别为 19.67% 和 19.70%,且具有三层 SiN_x 膜的太阳能电池的转换效率大于具有双层 SiN_x 膜的太阳能电池。在三层

SiN_x 膜的三种方案中,E方案太阳能电池具有较大的光电转换效率,与前面分析结果一致,但采用C方案的具有双层 SiN_x 膜的太阳能电池的光电转换效率不如采用B方案的具有双层 SiN_x 膜的太阳能电池的大。这可能是因为软件模拟存在一定的局限性。反射率和外量子效率的大小主要取决于薄膜结构,而光电转换效率的大小不仅与反射率和外量子效率等光学特性有关,还与薄膜钝化效果、基底材料性能等因素有关。

3.2 反射率测试结果分析

根据3.1节模拟分析结果,通过PECVD法可制作输出特性较好的具有双层 SiN_x 减反射膜的单晶硅太阳能电池(B结构)和具有三层 SiN_x 减反射膜的单晶硅太阳能电池(E方案)。图5所示为具有双层和三层 SiN_x 膜的太阳能电池的反射率测试曲线。可以发现,当波长位于300~600 nm范围内时,具有三层 SiN_x 膜的单晶硅太阳能电池的反射率明显小于具有双层 SiN_x 膜的单晶硅太阳能电池的;当波长位于600~1200 nm范围内时,两者基本一致,无明显变化。这与反射率模拟结果存在一定的差异。一方面,实际太阳能电池表面的减反射膜材料对入射太阳光有部分吸收,这是软件模拟时考虑不到的地方^[12];另一方面,通过PECVD法制作减反射膜时,镀膜腔体的温度、压强等分布不均会导致结果存在一定的差异。但就整个光谱响应范围而言,具有三层 SiN_x 膜的太阳能电池的减反射效果明显优于具有双层 SiN_x 膜的太阳能电池的减反射效果,测试结果与模拟结果一致。反射率越小,减反射效果越好,通过 SiN_x 膜进入到Si体内的光子数越多,激发产生的电子空穴对几率就越大,这有利于增大短路电流,进而增大太阳能电池的光电转换效率^[13]。

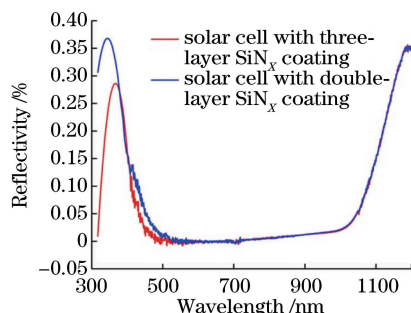


图5 具有双层和三层 SiN_x 膜的太阳能电池的反射率测试曲线

Fig. 5 Reflectivity testing curves of solar cells with double-layer and three-layer SiN_x coatings

3.3 少子寿命测试结果分析

多层减反射膜设计的目的在于使减反射膜结构

有更明显的减反射作用和更好的钝化效果。因此,为了进一步说明三层和双层 SiN_x 膜对太阳电池的钝化效果,对镀膜前后半成品电池片的少子寿命进行测试。表 3 所示为具有双层和三层 SiN_x 膜的太阳电池的少子寿命测试结果。由表 3 数据可知,双层和三层 SiN_x 镀膜前扩散 Si 片的平均少子寿命分别为 $15 \mu\text{s}$ 和 $16 \mu\text{s}$,两者基本一致。镀膜后双层和三层 SiN_x 膜半成品电池片的平均少子寿命分别为 $22 \mu\text{s}$ 和 $25 \mu\text{s}$,相比镀膜前分别增加了 $7 \mu\text{s}$ 和 $9 \mu\text{s}$,镀膜后具有三层 SiN_x 膜的太阳电池样品的少子寿命比具有双层 SiN_x 膜的太阳电池样品的大 $3 \mu\text{s}$ 。由此可知,三层 SiN_x 膜相比双层 SiN_x 膜具有更好的钝化效果。这说明三层 SiN_x 膜经烧结释放出更多的 H 离子进入 Si 片的表面及体内,减少了因 Si 片表面及体内缺陷而形成的复合中心,有助于太阳电池开路电压的增加^[14]。

表 3 具有双层和三层 SiN_x 膜的太阳电池的少子寿命测试结果

Table 3 Minority carrier lifetime testing results of solar cells with double-layer and three-layer SiN_x coatings (μs)

Type of solar cells	Before coating	After coating and sintering
With double-layer SiN_x coating	15	22
With three-layer SiN_x coating	16	25

表 4 具有双层和三层 SiN_x 膜的太阳电池的电学特性

Table 4 Electrical characteristics of solar cells with double-layer and three-layer SiN_x coatings

Type of solar cells	V_{oc}/V	I_{sc}/A	$F_F/\%$	$E_{ff}/\%$	R_s/Ω	R_{sh}/Ω
With double-layer SiN_x coating	0.6395	9.301	80.38	19.53	0.0017	336.7
With three-layer SiN_x coating	0.6431	9.368	79.45	19.58	0.0025	110.4

4 结 论

分析了双层和三层氮化硅减反射膜对单晶硅太阳电池的影响。通过 PC1D 软件从理论上分析了具有双层和三层 SiN_x 减反射膜的太阳电池的反射率、内外量子效率及光电转换效率。结果表明,具有三层 SiN_x 膜的太阳电池具有更好的减反射效果。在只改变 PECVD 工艺的基础上制作了具有双层和三层 SiN_x 膜的太阳电池,并对其反射率、少子寿命和电学特性进行了测试。结果表明,太阳电池反射率、转换效率测试结果与 PC1D 模拟结果基本吻合,三层 SiN_x 膜的钝化效果优于双层 SiN_x 膜的,具有三层 SiN_x 膜的太阳电池的电学特性优于具有双层

3.4 电学测试结果分析

表 4 给出了具有双层和三层 SiN_x 减反射的膜太阳电池的电学测试结果。由测试结果可知,相比双层 SiN_x 膜太阳电池,三层 SiN_x 膜太阳电池的开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 和转换效率 E_{ff} 分别增加了 36 mV 、 67 mA 和 0.05% ,与模拟结果基本一致。由上述分析可知,具有三层 SiN_x 膜的太阳电池良好的性能,这主要归功于三层 SiN_x 膜良好的减反射作用和钝化效果。减反射效果越好,进入 Si 体内的光子数越多,激发出电子空穴对的几率越大,少数载流子数目越多。钝化效果好可使少数载流子寿命增加,从而增大光电流,减小复合电流,增大开路电压,进而增大太阳电池的光电转换效率^[15]。另一方面,相比于双层 SiN_x 膜,三层 SiN_x 膜经烧结从薄膜中释放出了更多的 H 离子进入到 Si 体内。烧结前 H 离子在氮化硅薄膜中主要以 Si-H 键、H-H 键和 N-H 键的形式存在,烧结后这些键会获得能量挣脱共价键的束缚,形成游离的 H 离子,在薄膜中留下 Si、N 离子。这些 Si、N 离子固定在氮化硅薄膜中而无法移动,导致薄膜中固定电荷密度增大,场钝化效应增强,从而增加少数载流子寿命,增大短路电流、开路电压和太阳电池的光电转换效率^[16]。由测试结果还可以看出,具有三层 SiN_x 膜的太阳电池的填充因子 F_F 小于双层 SiN_x 膜太阳电池的。这主要是因为具有三层 SiN_x 膜的太阳电池的串联电阻 R_s 较大而并联电阻 R_{sh} 较小。

SiN_x 膜的太阳电池的。

参 考 文 献

- [1] Wang J R, Su S B, Zhu G X. Study on matching ability of deposition pressure and diffused sheet resistance for $\text{SiN}_x : \text{H}$ film[J]. Technology and Industry Across the Straits, 2016(3): 81-82.
王敬蕊, 苏树兵, 诸葛霞. $\text{SiN}_x : \text{H}$ 膜沉积压强和扩散薄层电阻的匹配性研究[J]. 海峡科技与产业, 2016(3): 81-82.
- [2] Lü W H, He Y F, Gong Y, *et al.* Effect of double-layer SiN_x antireflection/passivation coating on performance of multi-crystalline silicon solar cells[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(5): 707-

711.
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.
- [3] Kumar B, Pandian T B, Sreekiran E, *et al.* Benefit of dual layer silicon nitride anti-reflection coating[C]. Photovoltaic Specialists Conference, 2005: 1205-1208.
- [4] Hofstetter J, Canizo C D, Ponce-Alcántara S, *et al.* Optimisation of SiN_x :H anti-reflection coatings for silicon solar cells[C]. Spanish Conference on Electron Devices, 2007: 131-134.
- [5] Zoofakar 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[J]. International Conference on Information and Multimedia Technology, 2009: 543-547.
- [6] Yang W H, Li H B, Wu D X. Design and analysis of anti-reflection coating for solar cells[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2004, 10(1): 39-42.
杨文华, 李红波, 吴鼎祥. 太阳能电池减反射膜设计与分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, 10(1): 39-42.
- [7] Cheng L. Three layer anti-reflection and passivation film on the surface of solar cell: 201010152139[P]. 2011-01-26.
陈亮. 太阳能电池表面三层减反钝化膜: 201010152139[P]. 2011-01-26.
- [8] Xu F, Chen D S, Chen X J, *et al.* Study on three-layer antireflection coating for crystalline silicon solar cells[C]. The 12th China Photovoltaic Conference, 2012: 1-5.
徐飞, 陈德爽, 陈肖静, 等. 晶体硅太阳能电池三层减反射膜研究[C]. 第十二届中国光伏大会暨国际光伏展览会, 2012: 1-5.
- [9] Sun Z F, Wang W. Study on processing of three-layer silicon nitride antireflection coatings[J]. Science & Technology Information, 2014, 12(19): 4-4.
孙占峰, 王伟. 三层氮化硅减反射膜的工艺研究[J]. 科技资讯, 2014, 12(19): 4-4.
- [10] Han F, Li J. Exploration of three layers of silicon nitride film deposited on crystalline silicon solar cell[J]. Technology Wind, 2015(15): 64-65.
韩菲, 李健. 晶体硅太阳能电池沉积三层氮化硅薄膜的探索[J]. 科技风, 2015(15): 64-65.
- [11] Zou K, He J B, Li J, *et al.* Simulation on stack-layer passivation antireflection structure of metallurgical grade silicon solar cells[J]. Electronic Components & Materials, 2015, 34(6): 28-32.
邹凯, 和江变, 李健, 等. 物理冶金多晶硅太阳能电池叠层钝化减反射结构模拟[J]. 电子元件与材料, 2015, 43(6): 28-32.
- [12] Ma X J, Lin T, Chen Q B, *et al.* The application of double-layer silicon nitride films on the solar cell anti-reflection coatings[J]. International Journal of Nanomanufacturing, 2013, 9(3/4): 221-228.
- [13] Ma X J, Lin T. Effect of double-layer SiN_x film on mono-crystalline silicon solar cells and XPS characterization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 061608.
马新尖, 林涛. 双层 SiN_x 膜对单晶硅太阳能电池性能的影响及 XPS 表征[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 061608.
- [14] Ma X J, Lin T, Feng S C. Analysis of mono-crystalline silicon solar cells preventing PID coating process[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 041601.
马新尖, 林涛, 冯帅臣. 单晶硅太阳能电池防电势诱导衰减镀膜工艺分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 041601.
- [15] Han P Y, Ji J J, Wang Z G, *et al.* The study of SiO_2 - 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 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 叠层钝化膜的研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(12): 1449-1552.
- [16] Wen Z L, Cao X N, Zhou C L, *et al.* Influence of deposition temperature on the SiN_x :H film prepared by plasma enhanced chemical vapor deposition[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2011, 27(6): 1531-1536.
闻震利, 曹晓宁, 周春兰, 等. 沉积温度对等离子增强化学气相沉积法制备的 SiN_x :H 薄膜特性的影响[J]. 物理化学学报, 2011, 27(6): 1531-1536.