

# 晶硅异质结太阳能电池表面三层减反膜的设计与分析

施凯莹<sup>1</sup>, 韩少文<sup>1</sup>, 林本才<sup>2</sup>, 孙喜莲<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>南昌大学光伏研究院, 江西 南昌 330031;

<sup>2</sup>常州大学, 江苏省光伏科学与技术国家重点实验室培育建设点, 江苏 常州 213164

**摘要** 晶硅异质结太阳能电池表面的减反层是 ITO 薄膜, 其低的紫外透过率、高的近红外光学损耗限制了电池效率的提升。为此, 本文设计了三层减反膜来减小 ITO 薄膜的光学损耗。利用光学薄膜膜系设计软件 TFCalc、光线追迹程序(OPAL 2)和太阳能电池模拟软件 PC1D 对三层减反膜的光学性能和相应电池的电气性能进行了模拟和分析, 并对折射率色散效应、晶硅表面形貌以及各膜层的厚度容差进行了讨论。结果表明: 考虑折射率色散效应的三层减反膜比 ITO 薄膜的寄生吸收更小, 减反射带宽更大; 绒面硅表面减反膜比平面硅表面减反膜的加权平均光学损耗降低了 2.43 个百分点, 相应电池的短路电流密度和转换效率分别提高了 0.82 mA/cm<sup>2</sup> 和 0.34 个百分点; 减反膜中低折射率的 SiO<sub>x</sub> 膜层具有更大的厚度容差范围。

**关键词** 薄膜; 三层减反膜; ITO; 晶硅异质结太阳能电池; 加权平均反射率; 光学损耗

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2431001

## Design and Analysis of Triple-Layer Antireflection Film for Crystalline Silicon Heterogeneous Solar Cell

Shi Kaiying<sup>1</sup>, Han Shaowen<sup>1</sup>, Lin Bencai<sup>2</sup>, Sun Xilian<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Photovoltaics, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

<sup>2</sup>Jiangsu Province Cultivation Base for State Key Laboratory of Photovoltaic Science and Technology, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China

**Abstract** ITO film, as typical antireflection film in crystalline silicon heterogeneous solar cells, has low UV transmittance and high near-infrared optical loss, which restricts the efficiency improvement of the solar cells. Therefore, triple-layer antireflection film was designed in this paper. Firstly, we simulated and analyzed the optical performance of the triple-layer antireflection film and the electrical characteristics of the corresponding solar cell by using optical film design software TFCalc, light ray tracing program (OPAL 2), and solar cell simulation software PC1D. Then, the refractive-index dispersion effect, the surface morphology of crystalline silicon substrate, and the thickness tolerance of the films were discussed. The results show that the triple-layer antireflection film considering the refractive-index dispersion effect presented smaller parasitic absorption and larger antireflection bandwidth than ITO film. Besides, the weighted average optical loss of the triple-layer antireflection film on textured silicon was 2.43 percentage points lower than that on planar silicon, and the short-circuit current density and conversion efficiency of the corresponding solar cells were increased by 0.82 mA/cm<sup>2</sup> and 0.34 percentage points, respectively. In addition, the SiO<sub>x</sub> films with low refractive index had a larger thickness tolerance range.

**Key words** thin films; triple-layer antireflection film; ITO; crystalline silicon heterogeneous solar cell; weighted average reflectivity; optical loss

**OCIS codes** 310.1210; 350.6050; 310.4165; 310.6860

## 1 引 言

如何提高太阳能电池的光电转换效率一直是太阳能光伏行业致力研究的问题, 而太阳能电池表面光的

反射损耗是制约太阳能电池光电转换效率提高的重要因素。裸硅表面的光反射率可超过 30%, 即使硅表面进行制绒处理, 仍有约 11% 的光反射损失<sup>[1]</sup>。减反膜可以有效降低硅表面的光反射损耗, 从而提高

收稿日期: 2020-08-25; 修回日期: 2020-09-16; 录用日期: 2020-09-25

基金项目: 江苏省光伏科学与技术国家重点实验室培育建设点开放课题基金资助(SKLPST201905)、江苏省江雁计划

\* E-mail: sunxilian@ncu.edu.cn

太阳能电池的转换效率<sup>[2-5]</sup>。掺锡氧化铟(ITO)薄膜作为一种透明导电氧化物薄膜,具有优异的导电性和化学稳定性,是晶硅异质结太阳能电池中非常重要的减反膜<sup>[6-8]</sup>,通常作为单层膜使用。但其平均可见光透过率较低(小于90%),且在紫外区和近红外区存在寄生吸收损耗和反射损耗,降低了电池的效率<sup>[7]</sup>。

为了获得反射率更低和寄生吸收损耗更小的宽带减反膜,钟观发<sup>[8]</sup>采用H掺杂方法提高了ITO薄膜的可见光区透过率和电导率,ITO薄膜厚度约为100 nm。Kim等<sup>[9]</sup>利用斜角沉积方法制备了折射率呈梯度变化的六层ITO叠层减反膜,减小了ITO薄膜在近红外区的反射和吸收,但该六层减反膜具有较高的孔隙率,会影响载流子的传输性能。根据薄膜光学理论,三层减反膜可以获得比单层和双层减反膜更低的反射率和更宽的减反射带宽。三层减反膜中各膜层材料折射率的匹配非常重要,相邻膜层间的折射率差越大,界面反射率越大,而且最外层膜层的折射率越接近环境折射率,表面反射率越低。SiO<sub>x</sub>作为一种折射率较低的材料,在400~1000 nm波段的折射率为1.4~1.5<sup>[10]</sup>。纳米多孔SiO<sub>x</sub>薄膜具有更低的折射率<sup>[11]</sup>,而且当它与其他不同折射率材料(如SiN<sub>x</sub>、TiO<sub>2</sub>等)组成双层或多层减反膜时,可以获得良好的减反射效果,提高太阳能电池的光电转换效率<sup>[12-13]</sup>。ITO薄膜的折射率通常在2.1左右,为了匹配ITO薄膜和SiO<sub>x</sub>薄膜的折射率,需要引入一层过渡层。SiN<sub>x</sub>是晶硅太阳能电池中的常用减反射材料,其折射率随x值在1.8~2.7之间变化;同时,SiN<sub>x</sub>具有优异的钝化性能<sup>[14]</sup>,能够显著改善内量子效率在短波长范围内的光谱响应,提高光电转换效率<sup>[15]</sup>。因此,本文采用这几种材料设计了一种减反射性能优异的三层宽带减反膜,该膜系采用厚度更薄的ITO膜层,拓宽了减反射带宽,减小了寄生吸收,同时满足了异质结太阳能电池表面导电性的需求。此外,本文还分析了折射率色散效应对减反膜光学性能的影响,对比了平面硅和绒面硅表面减反膜的光学损耗。最后,本文利用太阳能电池模拟软件PC1D对相应电池的转换效率进行了模拟,获得了绒面硅表面减反膜各膜层厚度的容差范围。

## 2 减反膜优化设计理论

太阳能电池表面的减反膜是利用光的干涉效应来实现减反射效果的。对于单层减反膜,可以利用菲涅耳公式求得其反射率;而对于不同折射率材料组

成的多层减反膜,利用菲涅耳公式求其反射率便会十分复杂。此时可以用一个等效界面来表示,通过求出等效导纳Y来求膜系的反射率R<sup>[16]</sup>。三层减反膜的基本计算过程如下<sup>[17]</sup>:

设m层膜系的第k层膜层材料的折射率和厚度分别为n<sub>k</sub>和d<sub>k</sub>(k=1,2,⋯, m),入射介质和衬底材料的折射率分别为n<sub>0</sub>和n<sub>m+1</sub>,光线入射角为θ<sup>0</sup>,第k层膜的光学导纳为η<sub>k</sub>,衬底的光学导纳为η<sub>m+1</sub>,三层减反膜的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{k=1}^m \begin{bmatrix} \cos \delta_k & i(\sin \delta_k)/\eta_k \\ i\sin \delta_k & \cos \delta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{m+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,

$$\delta_k = 2\pi n_k d_k \cos \theta_k / \lambda, (k=0, 1, \dots, m), \quad (2)$$

式中:δ<sub>k</sub>为第k层膜的相位厚度;n<sub>k</sub>为第k层膜的折射率;θ<sub>k</sub>为第k层膜的入射角。

三层减反膜和衬底组合的等效导纳为

$$Y = \frac{C}{B}. \quad (3)$$

当光倾斜入射时,特定方向上的电磁矢量可以分为垂直于入射面的s偏振(s分量)和在入射面内的p偏振(p分量)。三层减反膜第k层膜上的光学导纳η<sub>k</sub>为

$$\eta_k = \begin{cases} \eta_k / \cos \theta_k, & \text{p-polarization} \\ \eta_k \cos \theta_k, & \text{s-polarization} \end{cases}, \quad (4)$$

其中θ<sub>k</sub>可由折射定律得出,即

$$n_0 \sin \theta_0 = n_k \sin \theta_k (k=1, 2, \dots, m, m+1). \quad (5)$$

膜系反射率R为

$$R = \left[ \frac{1 - Y/\eta_0}{1 + Y/\eta_0} \right]^2, \quad (6)$$

式中:η<sub>0</sub>为入射介质的光学导纳。

由上述反射率的计算过程可知,三层减反膜的反射率由各膜层的折射率、厚度以及入射角决定。本文对光垂直入射(入射角为0°)情况下减反膜的膜系结构进行了优化设计,通过调控减反膜各膜层的折射率和厚度来获得三层减反膜的最佳结构参数。由于晶硅太阳能电池的光谱响应范围为350~1100 nm(如图1所示),因此在设计减反膜时选择350~1100 nm作为设计波长范围,参考波长选取675 nm。

由于AM1.5太阳光谱的分布和晶硅太阳能电池的光谱响应特性曲线不一致,且减反膜的反射率随波长而变化,因此,在减反膜的设计过程中需要建立

一个综合评价膜系质量的函数,此函数为评价函数。评价函数要能反映减反膜对太阳能电池性能的影响。本文选用加权平均反射率作为评价函数  $F$ ,其表达式为<sup>[18]</sup>

$$F = \frac{\int_{0.35}^{1.1} S(\lambda) S_R(\lambda) R(\lambda) d(\lambda)}{\int_{0.35}^{1.1} S(\lambda) S_R(\lambda) d(\lambda)}, \quad (7)$$

式中: $S(\lambda)$ 为 AM1.5 太阳的光谱分布(如图 1 所示); $S_R(\lambda)$ 为晶硅太阳能电池的光谱响应特性; $R(\lambda)$ 为减反膜在对应波长点处的反射率。加权平均反射率反映了减反膜表面反射光子能量占总可用光子能量的比例,它能够准确地判断减反膜在晶硅太阳能电池光谱响应范围内总的减反射效果<sup>[19]</sup>。在太阳能电池减反膜的设计中,反射率越接近 0,光的利用率就越高,减反膜质量就越好,所以评价函数越小越好。利用 TFCalc 光学膜系设计软件对  $F$  值进行最小化来实现减反膜的优化设计。对于具有织构化表面结构的晶体硅,由于其表面织构化不仅影响薄膜表面的反射率,还影响吸收率,而且 TFCalc 膜系设计软件适用于平整表面薄膜的结构设计,因此,本文采用 OPAL 2 软件(PV Lighthouse 提供)对  $F$  值进行最小化来实现织构化晶硅表面减反膜的优化设计。

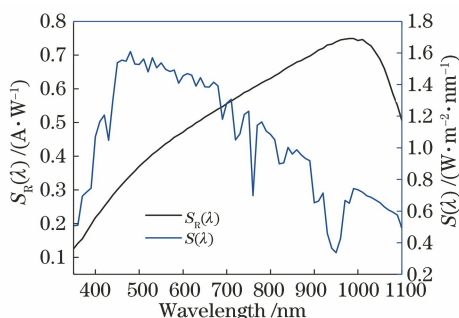


图 1 AM1.5 太阳光谱分布和晶硅太阳能电池的光谱响应特性曲线

Fig. 1 AM1.5 solar spectrum and spectral response characteristic curves of crystalline silicon solar cell

### 3 设计结果与讨论

#### 3.1 折射率色散效应对平面硅表面减反膜膜系设计的影响

为减少减反膜的寄生吸收,将 ITO 薄膜的厚度减小到 20~30 nm(同质结太阳能电池中 ITO 薄膜的厚度通常在 100 nm 左右)。当 ITO 膜较薄时,需要将一层折射率较高的膜层作为过渡层,目的是与高折射率的 ITO 和低折射率的外层相匹配,从而获得低的反射率。因此,设计三层减反膜的结构为

ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub>,如图 2 所示。

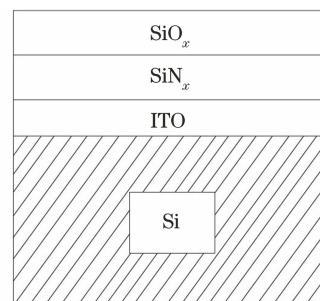


图 2 ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> 三层减反膜的结构图

Fig. 2 Structural diagram of ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> triple-layer antireflection film

由于膜层材料在不同波长下的折射率存在差别,因此折射率色散效应对减反射膜的反射特性具有重要影响<sup>[20]</sup>。本文在考虑和不考虑折射率色散效应两种情况下,对减反膜的膜系结构参数和反射率进行了对比和分析。在不考虑膜层材料折射率色散效应的情况下,通过调控各膜层材料的折射率和厚度,获得的加权平均反射率最小的膜系结构即为最佳的减反膜膜系结构:ITO(厚度  $d=30$  nm, 折射率  $n=2.00$ )/SiN<sub>x</sub>( $d=32$  nm,  $n=2.30$ )/SiO<sub>x</sub>( $d=117$  nm,  $n=1.31$ )。此种膜系结构用 module 1 表示,其反射率曲线如图 3(a)所示。module 1 的加权平均反射率与入射角的关系曲线如图 3(b)所示,出现最小加权平均反射率 1.95% 时的入射角为 0°,入射角在 0°~20° 范围内变化时,加权平均反射率低于 2%。考虑折射率色散效应(各膜层材料的折射率色散曲线如图 4 所示),并进一步优化各膜层厚度,获得加权平均反射率最小时,ITO、SiN<sub>x</sub> 和 SiO<sub>x</sub> 膜层厚度分别为 22, 35, 96 nm。此种膜系结构用 module 2 表示,其反射率曲线示于图 3(a)中, module 2 的加权平均反射率与入射角的关系示于图 3(b)中,出现最低加权平均反射率 1.76% 时的入射角为 0°,当入射角在 0~30° 变化时,加权平均反射率低于 2%。由此可知,考虑折射率色散效应时减反膜可以在更宽的人射角范围内获得更佳的减反射性能。

对比 module 1 和 module 2 的反射率曲线可以发现: module 2 具有更低的反射率和更宽的低反射带宽,尤其是在 350~490 nm 波长范围,其反射率比 module 1 低 3.8%,仅在 500~670 nm 波长范围内比 module 1 略高 1% 左右; module 2 的加权平均反射率较 module 1 低 0.19%; module 2 在晶硅太阳能电池光谱响应范围内表面反射率低于 2% 的带宽较 module

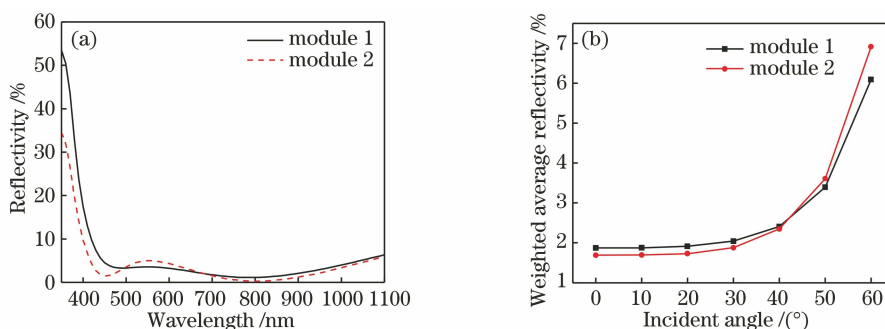


图 3 反射光谱以及加权平均反射率与入射角的关系。(a)有无考虑折射率色散效应情况下减反膜的反射光谱；(b)加权平均反射率与入射角的关系

Fig. 3 Reflection spectra and weighted average reflectivity versus incident angle. (a) Reflection spectra of antireflection film with or without considering refractive index dispersion effect; (b) weighted average reflectivity versus incident angle

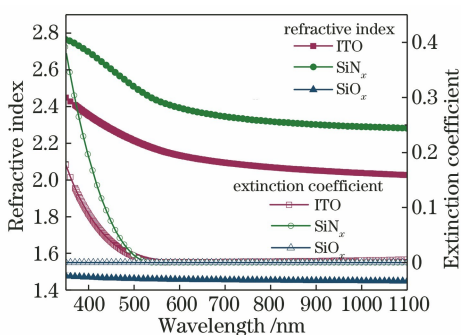


图 4 各膜层材料的折射率色散曲线

Fig. 4 Refractive index dispersion curve of each layer

1 宽 50 nm。以上说明考虑各膜层材料折射率色散效应的减反膜可以获得更好的减反射效果。

### 3.2 与 ITO 单层减反膜的比较

为了进一步分析平面硅表面 ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> 三层减反膜的减反射性能,将其与平面硅表面 ITO 单层减反膜进行对比。ITO 单层减反膜的折射率与 ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> 三层减反膜中 ITO 膜层的折射率一致,厚度与三层减反膜的总厚度一致。图 5 为

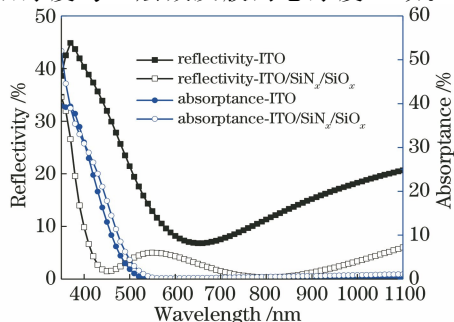


图 5 ITO 单层减反膜和 ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> 三层减反膜的反射光谱和吸收光谱曲线

Fig. 5 Reflection and absorption spectra of ITO single-layer antireflection film and ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> triple-layer antireflection film

ITO 单层减反膜和 ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> 三层减反膜的反射光谱和吸收光谱曲线。可以看出:与 ITO 单层减反膜相比,各波长下 ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> 三层减反膜的反射率均减小,加权平均反射率从 14.85% 降低到 2.85% (降低了 12 个百分点),并且反射率低于 2% 的波长范围增大了 260 nm;在大部分波长范围内,ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> 三层减反膜的吸收损耗都小于 ITO 单层减反膜,三层减反膜的加权平均吸收率从单层减反膜的 2.76% 降低到 1.92% (降低了 0.84 个百分点),并且增大了吸收率小于 0.1% 的波长范围,近红外光波段的吸收损耗有所减小。以上说明三层减反膜结构减小了减反膜的寄生吸收,增加了减反射的带宽。

### 3.3 平面硅和绒面硅表面减反膜结构和性能的对比

基于平面硅表面三层减反膜的最佳膜系结构 ITO (22 nm)/SiN<sub>x</sub> (35 nm)/SiO<sub>x</sub> (96 nm),利用 OPAL 2 光线追迹程序(PV Lighthouse 提供)模拟了具有倒金字塔绒面结构(高度为 3 μm,特征角为 54.74°)的晶体硅表面减反膜的反射率,其加权平均反射率为 0.17%。进一步优化参数,当减反膜中各膜层厚度分别为  $d(\text{ITO}) = 21 \text{ nm}$ 、 $d(\text{SiN}_x) = 35 \text{ nm}$ 、 $d(\text{SiO}_x) = 103 \text{ nm}$  时,该减反膜具有最小的加权平均反射率 0.16%。

图 6 为平面硅和绒面硅表面减反膜的反射光谱和光学损耗光谱曲线。由图可知,相较于平面硅,绒面硅减反膜的反射率在整个光谱响应波段均明显减小,尤其是在可见光波段。另外,绒面硅表面减反膜的光学损耗小于平面硅表面减反膜的光学损耗,前者的加权平均光学损耗较后者降低了 2.43 个百分点。

图 7 为平面硅和绒面硅表面减反膜的吸收光谱曲线。从图 7 中可以看到:各波长下绒面硅表面减

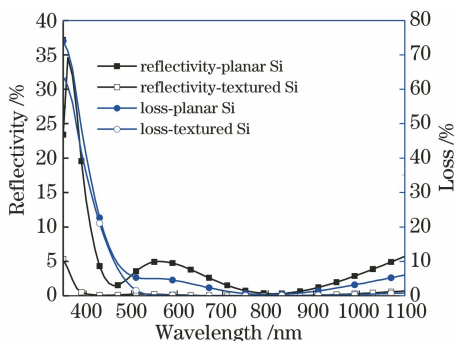


图 6 平面硅和绒面硅表面减反膜的反射光谱和光学损耗光谱曲线

Fig. 6 Reflection and optical loss spectra of antireflection film on planar silicon and textured silicon surfaces

反膜的吸收率都大于平面硅表面减反膜的吸收率；在 350~400 nm 波长范围内，绒面硅表面减反膜的平均吸收率为 48.96%，平面硅表面减反膜的平均吸收率为 36.92%，在其他波长下两者的吸收损耗几乎没有差别。因此，减反膜光学损耗的变化主要是由反射损耗决定的。

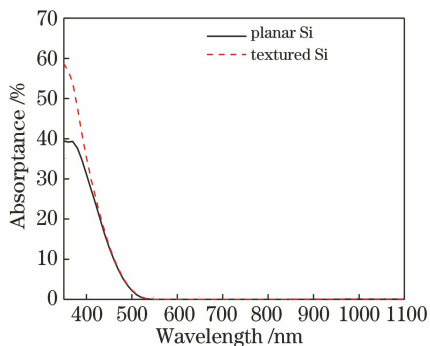


图 7 平面硅和绒面硅表面减反膜的吸收光谱曲线

Fig. 7 Absorption spectrum of antireflection film on planar silicon and textured silicon surfaces

绒面硅表面倒金字塔结构的存在，使得入射光照到倒金字塔时与硅表面发生三次相互作用，增加了电磁波光学路径的长度和反射的次数，降低了硅片对入射光的反射，增加了硅片对入射光的吸收<sup>[21]</sup>。因

此，绒面硅表面减反膜的反射损耗要比平面硅表面减反膜的反射损耗小很多，而吸收损耗略有增大。

分别将平面硅和绒面硅表面减反膜的反射损耗、吸收损耗和光学损耗数据存为反射率文件，利用太阳能电池建模工具 PC1D 对相应晶硅太阳电池的电学性能进行模拟计算<sup>[22]</sup>，得到了电流密度-电压特性曲线，如图 8 所示，表 1 列出了相应的电学输出性能参数。

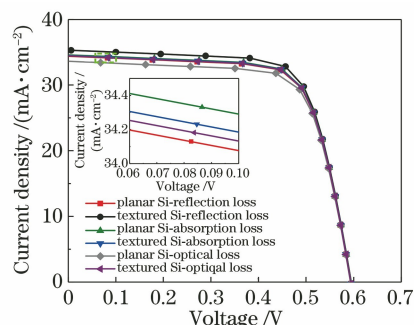


图 8 基于平面硅和绒面硅的晶硅太阳电池的电流密度-电压特性曲线

Fig. 8 Current density-voltage characteristics of crystalline silicon solar cells based on planar silicon and textured silicon

由表 1 可知：相对于平面硅太阳电池，绒面硅太阳电池在反射损耗下的短路电流密度增大了 0.94 mA/cm<sup>2</sup>，吸收损耗下的短路电流密度减小了 0.10 mA/cm<sup>2</sup>；绒面硅太阳电池在光学损耗下的短路电流密度增大了 0.82 mA/cm<sup>2</sup>，转换效率由 14.3% 提高到 14.64%（提高了 0.34 个百分点）。这是由于硅表面的倒金字塔结构减小了减反膜的反射损耗，增加了吸收损耗，由于减小的反射损耗产生的增益大于增加的吸收损耗产生的损失，因此使得最终的短路电流密度和转换效率增加，而开路电压变化不大（因为开路电压主要由材料带隙决定），填充因子略有减小。因此，绒面硅表面更小的光学损耗可以使基于绒面硅的晶硅太阳电池获得更高的电池转换效率。

表 1 基于平面硅和绒面硅的晶硅太阳电池的电学输出特性

Table 1 Electric characteristics of crystalline silicon solar cells on planar silicon and textured silicon

Cell design	Short-circuit current density / (mA·cm <sup>-2</sup> )	Open-circuit voltage / V	Filling factor / %	Conversion efficiency / %
Planar Si-reflection loss	34.38	0.5941	71.58	14.62
Textured Si-reflection loss	35.32	0.5948	72.16	15.16
Planar Si-absorption loss	34.59	0.5942	72.20	14.84
Textured Si-absorption loss	34.49	0.5942	71.53	14.66
Planar Si-optical loss	33.61	0.5935	71.69	14.30
Textured Si-optical loss	34.43	0.5941	71.57	14.64

### 3.4 绒面硅表面减反膜各膜层厚度的容差范围

图 9 为绒面硅表面减反膜的 optical loss 和相应太阳能电池转换效率随各膜层厚度的变化曲线。由图 9(a) 可知, optical loss 随着 ITO 膜层厚度的增加而明显增大, 随着 SiN<sub>x</sub> 和 SiO<sub>x</sub> 膜层厚度的增加而变化缓慢, 说明 ITO 膜层对减反膜 optical loss 的影响较大。由图 9(b) 可知, 相应晶硅太阳能电池的转换效率随着各膜层厚度的变化存在一个稳定值, 将此厚度变化范围称为厚度容差, 本文将其列于表 2 中。由图 9(b) 和表 2 可知, 当 ITO 膜层厚度在 20.9~22.7 nm、SiN<sub>x</sub> 膜层厚度在 34.9~36.6 nm、SiO<sub>x</sub>

膜层厚度在 82.8~126.3 nm 变化时, 晶硅太阳能电池的转换效率为 14.64%。相较于 ITO 和 SiN<sub>x</sub> 膜层, SiO<sub>x</sub> 膜层具有更大的厚度容差范围。在各膜层厚度容差范围内, ITO、SiN<sub>x</sub> 和 SiO<sub>x</sub> optical loss 的变化量分别为 0.59%、0.19% 和 0.1%。由此说明, optical loss 的微小变化对晶硅太阳能电池转换效率的影响很小, 几乎可以忽略, 转换效率可以认为是一个稳定值; 所设计绒面硅表面减反膜的 optical loss 和相应晶硅太阳能电池的转换效率对各膜层厚度变化的敏感性不同, 低折射率 SiO<sub>x</sub> 膜层具有更大的厚度容差范围。

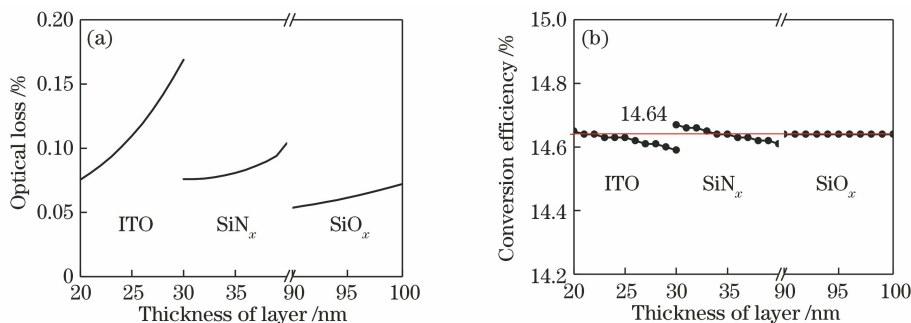


图 9 绒面硅表面减反膜 optical loss 和相应太阳能电池转换效率随各膜层厚度变化的曲线。

(a) optical loss 随膜层厚度的变化; (b) 转换效率随膜层厚度的变化

Fig. 9 Variations of optical loss of antireflection film on textured silicon surface and conversion efficiency of corresponding solar cell with film thickness of each layer. (a) Variation of optical loss with film thickness; (b) variation of conversion efficiency with film thickness

表 2 各膜层的厚度容差范围

Table 2 Thickness tolerance range of each layer

Layer of antireflection film	ITO layer	SiN <sub>x</sub> layer	SiO <sub>x</sub> layer
Thickness tolerance range /nm	20.9-22.7	34.9-36.6	82.8-126.3

## 4 结 论

本文利用 TFCalc 光学薄膜设计软件和 OPAL 2 太阳能电池光学模拟程序对平面硅和绒面硅表面 ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> 三层减反膜进行了设计和优化, 并对减反膜的结构和性能进行了分析讨论。结果表明, 相对于未考虑折射率色散效应的减反膜, 考虑色散效应时可以获得更低的加权平均反射率和更宽的低反射带宽, 所以在设计减反膜时需要考虑膜层材料的折射率色散效应。与 ITO 单层减反膜相比, ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> 三层减反膜的反射损耗和吸收损耗均减小, 加权平均反射率降低了 12 个百分点, 加权平均吸收率降低了 0.84 个百分点, 表面反射率低于 2% 的带宽增加了 260 nm。相对于平面硅表面减反膜, 绒面硅表面减反膜的吸收损耗略有增加, 但

由于其反射损耗大大降低, 所以总的 optical loss 较低。因此, 绒面硅太阳能电池的短路电流密度比平面硅太阳能电池增大了 0.82 mA/cm<sup>2</sup>, 光电转换效率提高了 0.34 个百分点, 绒面结构有利于提高太阳能电池的输出特性。绒面硅表面三层减反膜 ITO (21 nm)/SiN<sub>x</sub> (35 nm)/SiO<sub>x</sub> (103 nm) 具有最小的加权平均反射率 0.16%, 晶硅太阳能电池的转换效率对各膜层厚度的敏感性不同, 低折射率 SiO<sub>x</sub> 膜层具有更大的厚度容差范围。

本文对 ITO/SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> 三层减反膜的模拟和分析方法也可以运用到其他减反膜的设计中。需要指出的是, 本文考虑各膜层材料折射率色散效应对减反膜反射率的影响时, 采用的折射率数据是从 PV Lighthouse 网站的折射率数据库中导出的, 并不能涵盖所有的折射率数据。

## 参 考 文 献

- [1] Wang X Q. Research on silicon nitride thin film for solar cells and hydrogen passivation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003: 6-8.  
王晓泉. 太阳能电池用氮化硅薄膜及氢钝化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [2] Bencherif H, Dehimi L, Pezzimenti F, et al. Improving the efficiency of a-Si: H/c-Si thin heterojunction solar cells by using both antireflection coating engineering and diffraction grating [J]. *Optik*, 2019, 182: 682-693.
- [3] Wang X, Lu G, Kang H T, et al. Design and analysis of multilayer antireflective film of crystal silicon solar cells [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2019, 43(3): 483-485.  
王鑫, 卢刚, 康海涛, 等. 晶硅太阳能电池多层减反射膜设计与分析[J]. *电源技术*, 2019, 43(3): 483-485.
- [4] Yan X, Chen N, Suhaimi F B, et al. Design, fabrication, and analysis of double-layer antireflection coatings (ARC) for industrial bifacial n-type crystalline silicon solar cells [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(15): E1-E6.
- [5] Zhou J, Yu J, Ma Z Q, et al. Research on triple-layer anti-reflection structures and opto-electronic properties of SHJ solar cell[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(2): 303-309.  
周杰, 俞健, 马忠权, 等. SHJ 太阳能电池叠层减反结构及光电性能研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(2): 303-309.
- [6] Cruz A, Wang E C, Morales-Vilches A B, et al. Effect of front TCO on the performance of rear-junction silicon heterojunction solar cells: insights from simulations and experiments[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 195: 339-345.
- [7] Li S, Shi Z F, Tang Z J, et al. Study on the hydrogen doped indium oxide for silicon heterojunction solar cell application [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 705: 198-204.
- [8] Zhong G F. Research on HAC solar cell technology [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020: 21-25.  
钟观发. HAC 太阳能电池技术研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020: 21-25.
- [9] Kim J, Chhajed S, Schubert M, et al. Light-extraction enhancement of GaInN light-emitting diodes by graded-refractive-index indium tin oxide anti-reflection contact [J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(4): 801-804.
- [10] Jin G J, Xu K, Tan J, et al. Encapsulation structure of gradient refractive index with ultralow reflectance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0231001.  
金国君, 徐恺, 檀珺, 等. 具有超低反射率的折射率渐变封装结构 [J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0231001.
- [11] Xiong H, Tang Y X, Hu L L, et al. Stability of surface-modified porous silica antireflective coating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0831001.  
熊怀, 唐永兴, 胡丽丽, 等. 表面改性多孔二氧化硅减反膜的稳定性研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0831001.
- [12] Yu J, Zhou J, Bian J T, et al. Realization of  $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x$  stacks as multi anti-reflection coatings and selectively copper-plating mask for silicon heterojunction solar cell with 23.5% efficiency[C]// 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC). June 10-15, 2018, Waikoloa Village, HI, USA. New York: IEEE Press, 2018: 0049-0052.
- [13] Ye L Q, Ge X M, Wang X C, et al. Design and preparation of durable double-layer non-quarter-wave antireflective coatings [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(7): 8504-8509.
- [14] Wan Y M, McIntosh K R, Thomson A F. Characterisation and optimisation of PECVD  $\text{SiN}_x$  as an antireflection coating and passivation layer for silicon solar cells [J]. *AIP Advances*, 2013, 3(3): 032113.
- [15] Elgamel H E A. High-efficiency polycrystalline silicon film solar cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1998, 53(3/4): 269-275.
- [16] Mao S, Zhao J L. Optimal design for multi-layer diffractive optical elements with antireflection films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0305001.  
毛珊, 赵建林. 镀有增透膜的多层衍射光学元件的优化设计方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0305001.
- [17] Lin Y C, Lu W Q. Principle of optical thin film[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990: 35-39.  
林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 35-39.
- [18] Redfield D. Method for evaluation of antireflection coatings [J]. *Solar Cells*, 1981, 3(1): 27-33.
- [19] Kong W J, Cao K H, You C L, et al. Optimization of wide spectrum anti-reflective grating for solar cell [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1205001.  
孔伟金, 曹凯华, 由成龙, 等. 太阳能电池用宽光谱减反射光栅的优化设计 [J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1205001.
- [20] Wang A X, Zhang X J, Li J J. Dispersion effect on optimized design of anti-reflection coatings for

passivated silicon solar cells dispersion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0621003.

王安祥, 张晓军, 李继军. 色散效应对钝化硅太阳电池减反射膜系设计的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(6): 0621003.

- [21] Smith A W, Rohatgi A. Ray tracing analysis of the inverted pyramid texturing geometry for high efficiency silicon solar cells [J]. *Solar Energy*

*Materials and Solar Cells*, 1993, 29(1): 37-49.

- [22] Clugston D A, Basore P A. PC1D version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers [C] // *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1997*. September 29-October 3, 1997, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 1997: 207-210.