

基于平面硅的晶硅异质结太阳电池表面减反膜的优化

韩少文^{1**}, 孙喜莲^{1*}, 林本才², 黄海宾¹, 周浪¹¹南昌大学光伏研究院, 江西 南昌 330031;²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 目前晶硅异质结太阳电池大多采用刻蚀绒面来减小光学损耗, 但该方法工艺繁琐, 且重复性和后期镀膜均匀性不佳; 同时, 绒面增加了载流子的传输路径和复合概率, 限制了电池性能的提高。本文利用太阳电池模拟软件 OPAL 和光学膜系设计软件 TFCalc, 以平面硅为衬底, 设计了一种双层 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 减反膜。考虑到太阳光谱分布和异质结太阳电池的光谱响应, 本文以加权平均光学损耗作为评价函数, 将 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 双层减反膜与玻璃、衬底作为一体进行了优化, 并将本文设计的减反膜与绒面硅上单层 ITO 减反膜的加权平均光学损耗进行了对比。结果表明, 与绒面硅上单层 ITO 减反膜相比, 所设计的双层减反膜的加权平均光学损耗更小, 为 4.69%, 较单层 ITO 减反膜减小了 1.97 个百分点, 且吸收损耗显著降低。本文研究为平面硅替代绒面硅提供了理论支持。

关键词 薄膜; 晶硅异质结太阳电池; ITO; 平面硅; $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$; 光学损耗

中图分类号 O484.4+1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0931001

Optimization of Antireflection Film for Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells on Planar Silicon

Han Shaowen^{1**}, Sun Xilian^{1*}, Lin Bencai², Huang Haibin¹, Zhou Lang¹¹*Institute of Photovoltaics, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;*²*Jiangsu Province Cultivation Base for State Key Laboratory of Photovoltaic Science and Technology, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China*

Abstract At present, the optical losses of crystalline silicon heterojunction solar cells are mostly reduced with textured surfaces. However, this method has a complicated process and poor repeatability and film uniformity; meanwhile, the textured surfaces increase the carrier transfer path and electron-hole recombination, which hinders the improvement of cell performance. In this paper, a double-layer $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ antireflection film on planar silicon substrate was designed by OPAL and TFCalc. Considering the solar spectrum distribution and the spectral response of the crystalline silicon heterojunction solar cells, we optimized this antireflection film by taking the film, glass, and substrate as a whole, with the weighted average optical loss as the evaluation function. Furthermore, the designed film was compared with a single-layer ITO antireflection film on textured silicon in terms of the weighted average optical loss. The results show that the weighted average optical loss of the double-layer antireflection film was 4.69%, which was about 1.97 percentage points lower than that of the single-layer ITO film on textured silicon. Also, the absorption loss of the double-layer film significantly dropped. Our findings provide theoretical support to replace textured silicon with planar silicon.

Key words thin films; crystalline silicon heterojunction solar cell; ITO; planar silicon; $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$; optical loss

OCIS codes 310.4165; 310.1210; 310.1620; 310.4165; 310.6860

收稿日期: 2020-09-28; 修回日期: 2020-11-12; 录用日期: 2020-12-02

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(SKLPST201905)、江苏省江雁计划项目

* E-mail: sunxilian@ncu.edu.cn; ** E-mail: 1608856887@qq.com

1 引言

太阳能电池的工作原理是利用光生伏特效应将光能转换为电能。光利用率是决定电池性能的关键。为了提高太阳能电池的光利用率,应尽可能增加光的入射并减少光的反射和透过损失^[1]。目前常用的方法是在电池表面镀制减反膜^[2-3]以及在衬底上刻蚀绒面^[4-6]。对于晶硅太阳能电池,通常采用湿化学法在衬底上刻蚀 1~10 μm 高度的金字塔或球帽型结构。化学腐蚀过程中需要使用大量的腐蚀性强酸或强碱,增加了废液处理成本,而且,如果废液处理不当就会造成环境污染,从而使得太阳能电池不再是绿色能源,违背了太阳能电池的设计理念。此外,化学腐蚀的时间、温度以及腐蚀液的成分和浓度都会影响绒面结构^[7-9],增加了工艺控制的难度^[4]。此外,对于晶硅异质结太阳能电池,其本征非晶硅钝化层的厚度通常为 5~10 nm,非常薄,刻蚀形成的塔尖、棱和相邻金字塔底部峡谷处(根部交线)一般十分尖锐,导致绒面上生长的非晶硅钝化膜的质量和均匀性不佳,影响了电池性能的提高^[5]。而且,绒面明显增加了硅衬底的比表面积,延长了载流子在衬底上的运输距离,增加了载流子的复合概率,从而减小了载流子的收集概率^[6]。

针对制绒工艺的不足,研究人员尝试通过改变刻蚀液成分^[7-9]或采用铜银共催化刻蚀法^[10]来简化制绒工艺,调控绒面结构的圆化程度,以提高载流子的寿命,增加载流子的收集概率。但是这些方法都未能从根本上解决绒面结构对晶硅异质结太阳能电池表面钝化膜层质量和均匀性欠佳的问题。

在平整表面镀制减反膜是减少光反射损失的常用方法。一些钙钛矿太阳能电池和硅薄膜太阳能电池由于结构和制备工艺的特殊性,很难或不宜在吸收体上制备绒面结构,因为绒面结构会影响薄膜质量的均匀性或引入孔洞,从而劣化电池的性能^[11-13]。这些电池一般通过在其表面制备双层或多层减反膜来降低反射损耗,提高电流密度。TiO₂ 是太阳能电池中常用的一种减反射材料,其折射率在 2.55~2.76 之间,能够破坏硅/空气界面间的干涉,从而降低特定波段的光反射。据报道^[14],通过在硅/碳纳米管(CNT)异质结太阳能电池表面制备 TiO₂ 薄膜,可将 600 nm 波长处的反射率降低至 5% 以下。SiN_x 作为硅太阳能电池中常用的一种钝化减反射材料,折射率在 1.8~2.6 之间,制备工艺比较成熟,且与晶硅太阳能电池的生产工艺具有良好的兼容性。Li 等^[15]

在晶硅薄膜太阳能电池表面制备了 SiN_x/a-Si:H 双层减反膜,将反射率降低至 3.5%。Ma 等^[16]采用四层减反膜 Al₂O₃/SiN_x:H/SiN_x:H/SiO₂ 将平面晶硅太阳能电池的平均反射率降低到 4.5%。

在现有的报道中,晶硅异质结太阳能电池表面减反膜的设计仅针对电池片的性能进行优化,而电池经玻璃封装成组件后,光路会发生变化,此时电池表面的减反膜对组件来说并非最优;因此,本文将电池和封装玻璃作为一个整体进行优化,以进一步降低组件的光学损耗。此外,与现有的设计和工艺相比,本文以平面硅为衬底,省去了制绒工艺,不仅可以减少大量腐蚀性酸碱试剂的使用,改善工艺重复性,而且有助于提高本征钝化层的薄膜质量,进而增加载流子的收集概率。本文首先利用太阳能电池模拟软件 OPAL 和光学模拟软件 TFCalc 分析了传统绒面晶硅异质结太阳能电池表面 ITO 减反膜以空气和玻璃为入射介质时的加权光学损耗,研究了太阳能电池封装后,封装玻璃对电池光学性能的影响;然后在平面硅上设计了 TiO₂/SiN_x 双层减反膜,并将其与硅衬底、钝化层、发射极以及封装玻璃作为一个整体进行优化,获得了较绒面硅上 ITO 单层减反膜更低的吸收损耗和光学损耗。

2 减反膜优化设计方法

单层减反膜利用光在膜层上下界面处的反射光存在相位差的干涉原理来实现减反效果,如果介质没有吸收,当分界面是光学表面且光线垂直入射时,就可以利用菲涅耳公式求得反射率。

由于单层减反膜的带宽很窄,因此采用双层或多层减反膜^[15-20]来拓展其带宽,同时进一步降低反射率。对于多层减反膜系,基于等效界面的思想,可将薄膜系统与基底组合成为一个新的等效介质。该介质的等效光学导纳 Y 可表示为^[21]

$$Y = \frac{C}{B}, \quad (1)$$

其中,

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{m=1}^n \begin{bmatrix} \cos \delta_m & (i \sin \delta_m) / \eta_m \\ i \eta_m \sin \delta_m & \cos \delta_m \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{si} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: m 为膜系的层数; η_m 为第 m 层膜的折射率; η_{si} 为硅的折射率; δ_m 为第 m 层薄膜的相位厚度, $\delta_m = 2\pi n_m d_m \cos \theta_m / \lambda$,其中, n_m 为第 m 层膜的折射率, d_m 为第 m 层膜厚, θ_m 为光在第 m 层膜上的入射角, λ 为入射光的波长。多层减反膜的反射率为

$$R = \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right)^* \quad (3)$$

式中： η_0 为入射介质的折射率。由(3)式可知，减反膜的反射率 R 取决于膜层的结构参数，通过调整膜系的层数和各膜层的厚度及折射率可以获得最小的反射率。对于晶硅太阳能电池，封装前，入射介质为空气， $\eta_0 = 1$ ，封装后，入射介质为玻璃， $\eta_0 = 1.5$ 。

由于太阳光谱分布与晶硅异质结太阳能电池的光谱响应不一致，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。评价函数要能够反映减反膜对太阳能电池性能的影响。减反膜的反射和吸收都会影响电池对光的利用，因此，为了准确描述晶硅异质结太阳能电池的光学性能，本文引入了包含反射和吸收损耗的加权平均光学损耗，将其作为评价减反膜性能的依据。加权平均光学损耗的计算公式^[22]为

$$T_w = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) \Phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

式中： $T(\lambda)$ 为光学损耗； $\Phi(\lambda)$ 为太阳光谱强度； $S(\lambda)$ 为晶硅异质结太阳能电池的光谱响应。加权平均光学损耗反映了减反膜表面反射和体内吸收光子能量占总可用光子能量的比例，可通过这一参数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。在太阳能电池减反膜的设计中，光学损耗值越接近 0，光的利用率就越高，减反膜的质量就越好，所以加权平均光学损耗越小越好。利用 TFCalc 光学膜系设计软件计算 T_w 的最小值，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，由于表面织构不仅影响薄膜表面的反射率，还会影响吸收率，而 TFCalc 膜系设计软件适用于平整表面薄膜的结构设计，因此，本文利用太阳能电池模拟软件 OPAL 软件(PV Lighthouse 提供)计算 T_w 的最小值，以实现织构化晶硅表面减反膜的优化设计。

晶硅异质结太阳能电池表面有本征钝化层(i-Si)和发射极(p-Si)，在设计减反膜时需要考虑这两层膜。先利用 OPAL 对包含本征钝化层和发射极膜层的减反膜进行优化，获得本征钝化层、发射极膜层的厚度以及氧化铟锡(ITO)膜层的折射率和厚度，分析讨论入射介质对电池加权平均光学损耗(以下简称“光学损耗”)的影响。在此基础上，利用 TFCalc 在平面硅上设计双层减反膜 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ ，将其与下层的 i-Si、p-Si 及晶硅衬底组合成一个新的等效介质，以玻璃为入射介质，运用等效介质理论进行光学损耗的计算，通过调控 TiO_2 和 SiN_x 膜层的折射率和厚度，获得最小的光学损耗。绒面硅太阳能电池减反结构光学损耗的相关模拟条件列于表 1 中，图 1(a)、(b)为玻璃封装前后绒面硅异质结太阳能电池的结构示意图，图 1(c)为玻璃封装平面硅异质结太阳能电池表面两层减反膜的结构示意图。

表 1 OPAL 模拟的基本条件

Table 1 Basic conditions for OPAL simulation

| Item | Content |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| Ambient | Air($n=1$), glass($n=1.5$) |
| Texturing | Upright pyramid |
| Wavelength /nm | 300-1200 |
| Spectrum | AM1.5G |
| Thickness of silicon / μm | 180 |
| Structure | c-Si/i-Si/p-Si/ITO |

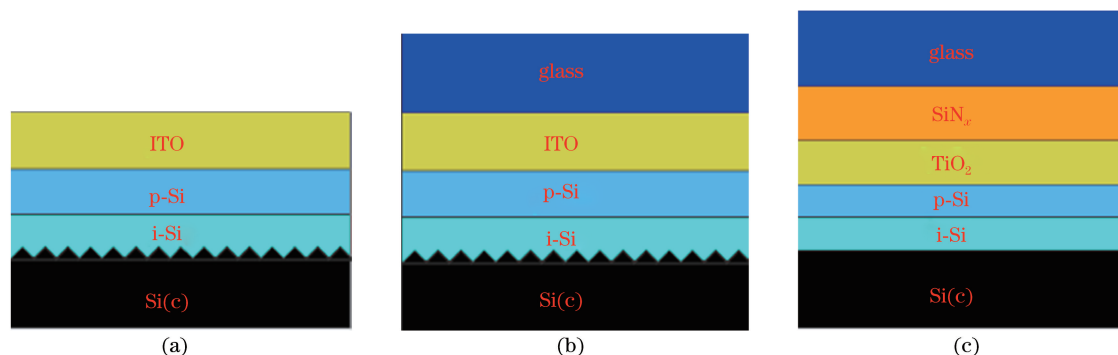


图 1 太阳能电池表面两层减反膜的结构示意图。(a)(b)封装前后绒面硅异质结太阳能电池；(c)封装后的平面硅异质结太阳能电池

Fig. 1 Structural diagram of double-layer antireflection films on the surface of solar cells. (a)(b) Textured silicon heterojunction solar cells before and after encapsulation; (c) planar silicon heterojunction solar cell after encapsulation

3 结果分析

3.1 本征非晶硅和 p-Si 膜层厚度的确定

对于晶硅异质结太阳能电池,作为钝化层和发射极的本征非晶硅(i-Si)和 p-Si 膜层的厚度对电池性能有很大影响^[23-25]。为了确定这两层膜的厚度,利用 OPAL 分别模拟了太阳能电池光学损耗随 i-Si 和 p-Si 膜层厚度的变化,如图 2 所示。模拟条件如下:入射介质为空气,以绒面硅为衬底,ITO 膜层的折射率和厚度分别为 2.06 和 72 nm,p-Si 层厚度为 10 nm,i-Si 层厚度为 5~15 nm。

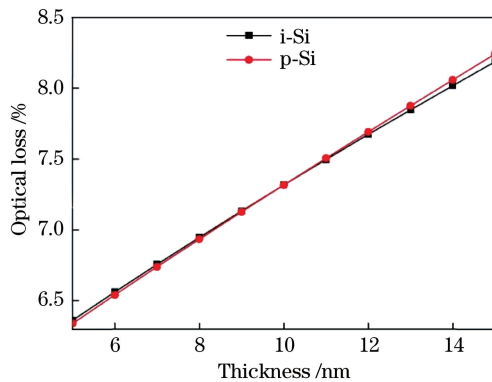


图 2 光学损耗随 i-Si 和 p-Si 膜层厚度的变化

Fig. 2 Variation of optical loss with film thickness of i-Si and p-Si film layers

由图 2 可知,光学损耗随着 i-Si 层厚度的增加而线性增大。优化 i-Si 层的厚度时,需要保持一定的厚度以实现良好的钝化,同时电池的开路电压 V_{oc} 和填充因子 F 不能大幅下降^[23]。Fujiwara 等^[24]得到的最小可接受的 i-Si 层厚度为 4 nm。如果 i-Si 层厚度小于 4 nm,可能会由于钝化效果不好而使开路电压快速下降,同时填充因子亦减小。为了使光学损耗最小且工艺上便于实现,同时保持良好的钝化效果,本文取 i-Si 层厚度为 10 nm。

保持 i-Si 层厚度不变,将 p-Si 层厚度从 5 nm 增加至 15 nm,得到光学损耗随 p-Si 层厚度的变化,如图 2 所示。与 i-Si 层的变化趋势相同,光学损耗亦随着 p-Si 层厚度的增加呈线性上升的趋势。因此,发射极膜层厚度应尽可能薄。对于 p-Si 层厚度的优化,一方面要保证 a-Si:H 能形成连续膜,以免后续工艺中产生漏电现象^[25],另一方面要考虑当发射层很薄时,电池的开路电压和填充因子会随厚度减小而迅速减小^[24]。综合考虑后,本文取 p-Si 层厚度为 10 nm。

3.2 玻璃封装前后绒面硅太阳能电池表面单层 ITO 减反膜的光学性能

图 3 为 ITO 薄膜的折射率(n)和消光系数(k)的色散曲线。由图 3 可知,4 种 ITO 的折射率均随着波长的增大而减小,折射率 n 为 1.73、1.80、2.01 的 ITO 薄膜的消光系数均随着波长的增大而先减小后增大,而折射率 n 为 2.06 的 ITO 薄膜的消光系数则随着波长的增大而减小并逐渐趋于 0;ITO 薄膜的折射率越大,其在短波段(300~450 nm)的消光系数越大,在长波段(450~1200 nm)的消光系数越小。因此,高折射率 ITO 薄膜在短波段的寄生吸收损耗较大,在长波段的吸收损耗较小,而低折射率薄膜则刚好相反。由于 450~1200 nm 波段在太阳光谱中的占比较大,因此本文主要对高折射率 ITO 薄膜的光学性能进行分析。

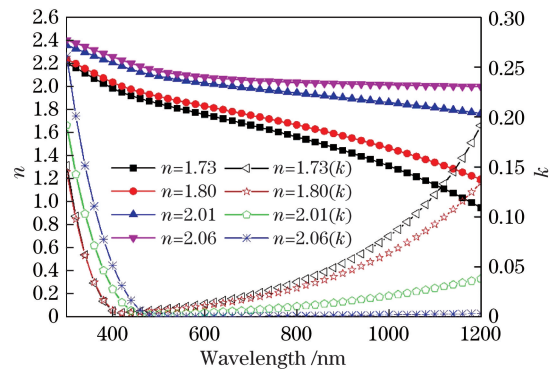


图 3 ITO 薄膜折射率和消光系数的色散曲线

Fig. 3 Refractive index (n) and extinction coefficient (k) dispersion curves of ITO

图 4 为玻璃封装前后绒面硅太阳能电池表面不同折射率 ITO 薄膜的光学损耗随其厚度的变化。可以看出:玻璃封装前(入射介质为空气),当折射率为 2.06 时,光学损耗相对较小,且光学损耗随着 ITO 薄膜厚度的增加而先减小后增大,并在厚度为 74 nm 时获得最小的光学损耗(7.32%),较折射率为 2.01 的薄膜的最小光学损耗减小了 1.05 个百分点。这一结果说明高折射率 ITO 薄膜的光学匹配更佳。

电池片最终会被玻璃封装成组件。电池片经玻璃封装后,入射介质为玻璃,光的传播路径会发生变化,因此,本文将电池片与玻璃作为一个整体进行优化。封装后的 ITO 薄膜的结构和性能参数如图 4 和表 2 所示。由图 4 可知,高折射率 ITO 薄膜的光学损耗仍更低,且其亦随着薄膜厚度的增加存在极小值,最低光学损耗为 6.66%,最佳厚度为 72 nm。与封装前相比,光学损耗降低了 0.66 个百分点,即玻璃具有一定的光学增益。这是因为玻璃的折射率

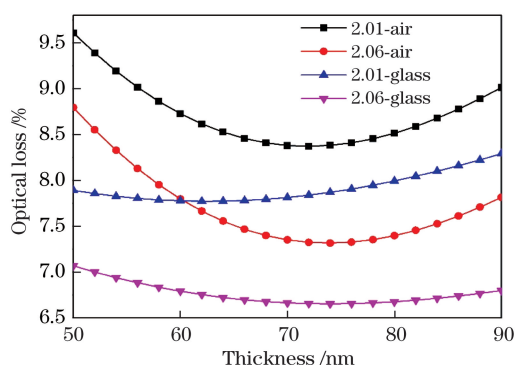


图 4 玻璃封装前后绒面硅太阳能电池表面 ITO 薄膜的
光学损耗随其厚度的变化

Fig. 4 Variation of optical loss of ITO antireflection film
on the surface of textured silicon solar cells with
its thickness before and after glass encapsulation

表 2 光伏玻璃封装前后 ITO 减反膜的最佳厚度和光学损耗

Table 2 Optimal thickness and optical loss of ITO antireflection film before and after glass encapsulation

| Parameter | Optimal thickness and optical loss of ITO antireflection film before glass encapsulation ($\eta_0 = 1$) | | Optimal thickness and optical loss of ITO antireflection film after glass encapsulation ($\eta_0 = 1.5$) | |
|-----------------|---|------------|--|------------|
| | $n = 2.01$ | $n = 2.06$ | $n = 2.01$ | $n = 2.06$ |
| | Optimal thickness /nm | 72 | 74 | 62 |
| Optical loss /% | 8.37 | 7.32 | 7.77 | 6.66 |

和 p-Si 层厚度减薄至 5 nm,其他参数不变。将减反膜与硅衬底及封装玻璃作为整体进行优化,通过膜层结构参数的调控使其光学损耗最小。先利用 OPAL 对减反膜进行初步优化,以最小光学损耗为优化目标,得到该双层减反膜的结构参数。结果表明:当 TiO_2 薄膜和 SiN_x 薄膜的折射率分别为 2.3 和 1.92($\lambda = 600 \text{ nm}$),厚度分别为 50 nm 和 46 nm 时,光学损耗最小,为 6.88%。在此基础上,利用 TFCalc 进一步优化 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 双层减反膜的折射率和厚度。先固定 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 减反膜中各膜层的厚度以及 TiO_2 薄膜的折射率,考察 SiN_x 薄膜折射率与光学损耗的关系,得到光学损耗最小时 SiN_x 薄膜的折射率;然后固定 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 减反膜中各膜层厚度以及 SiN_x 薄膜的折射率,考察 TiO_2 薄膜折射率与光学损耗的关系,如图 5 所示。由图 5 可知:随着 SiN_x 薄膜折射率的增加,光学损耗先减小后增大,当 SiN_x 薄膜的折射率为 1.85 时,获得最小的光学损耗(6.86%);随着 TiO_2 薄膜折射率的增加,光学损耗先减小后增大,当 TiO_2 薄膜的折射率为 2.6 时,获得最小的光学损耗(5.98%)。通过以上分析可以得到 TiO_2 薄膜和 SiN_x 薄膜的最优折射率分别为 2.6 和 1.85。

介于 ITO 与空气之间,减小了光线从空气到减反膜的折射率突变,相当于在高折射率膜层上引入了一低折射率层,使等效折射率减小,反射系数降低。

此外,模拟结果显示,当 ITO 薄膜的折射率为 2.01,获得最低光学损耗(7.77%)的最佳厚度为 62 nm,与封装前相差 10 nm,而光学匹配更佳的高折射率膜的厚度仅相差 2 nm。由此说明,ITO 薄膜的最佳厚度受入射介质和折射率的影响较大,光学匹配更佳的减反膜可以获得更小的光学损耗。因此,在进行减反膜设计时,应将太阳能电池表面的减反膜与封装材料作为一个整体进行优化。

3.3 平面硅衬底上两层减反膜的光学性能

相对于绒面硅衬底,平面硅衬底更有利于获得均匀的本征非晶硅(i-Si)薄膜和 p-Si 薄膜,故将 i-Si

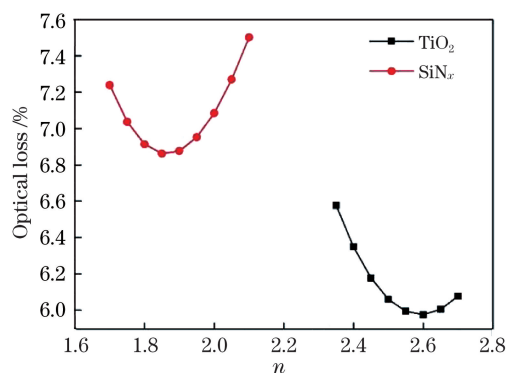


图 5 平面硅太阳能电池表面 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 减反膜的
光学损耗随各膜层折射率的变化

Fig. 5 Variation of optical loss of $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ antireflection
films on the surface of planar silicon solar cells
with the refractive index of each film layer

在上述优化的基础上,本文进一步优化了 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 减反膜中各膜层的厚度。图 6 为平面硅太阳能电池表面 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 减反膜的光学损耗随各膜层厚度的变化。由图 6 可知:随着 SiN_x 薄膜厚度的增加,光学损耗先减小后增大,当 SiN_x 薄膜厚度为 82 nm 时,获得最小的光学损耗(4.80%);当 TiO_2 薄膜厚度为 54 nm 时,光学损耗最小,为 4.69%。

通过以上分析得到了 TiO_2 薄膜和 SiN_x 薄膜

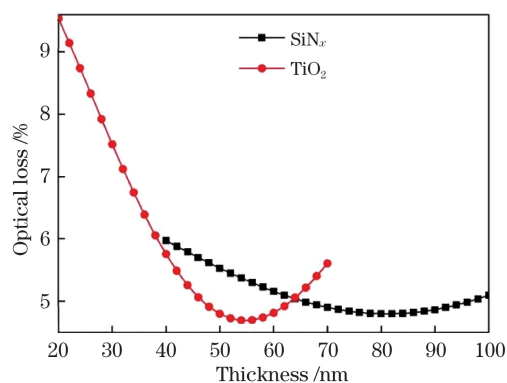


图 6 平面硅太阳能电池表面 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 减反膜的
光学损耗随各膜层厚度的变化

Fig. 6 Variation of optical loss of $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ antireflection
film on the surface of planar silicon solar cells
with the thickness of each layer

的最优折射率和最优厚度,分别为 2.6 和 54 nm 以及 1.85 和 82 nm,此时光学损耗为 4.69%,与绒面硅太阳能电池表面单层 ITO 减反膜的最小光学损耗 6.66% 相比,降低了 1.97 个百分点。

图 7 为绒面硅上单层 ITO 薄膜与平面硅上 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 减反膜的反射损耗和吸收损耗随波长的变化。由图 7 可知:当波长小于 600 nm 时,双层减反膜的反射损耗高于单层 ITO 减反膜,但吸收损耗低于后者,说明 ITO 薄膜的吸收损耗很大;当波长为 600~1100 nm 时,二者的光学损耗都较低,趋近于零。

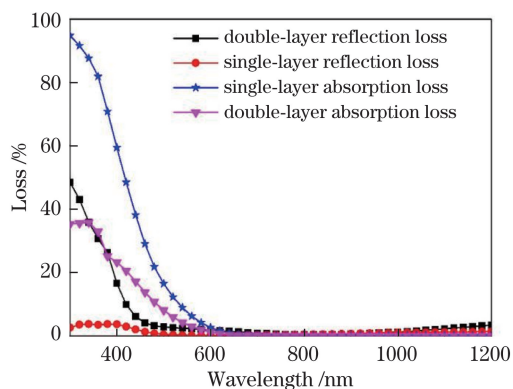


图 7 绒面硅上单层 ITO 薄膜与平面硅上 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 双
层减反膜吸收损耗和反射损耗随波长的变化曲线

Fig. 7 Changes of absorption loss and reflection loss of
single-layer ITO film on textured silicon and
 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ double-layer antireflection film on
planar silicon with wavelength

图 8 为绒面硅上单层 ITO 薄膜与平面硅上 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 双层减反膜的光学损耗随入射角的变化。由图 8 可知:当入射角小于 40° 时,光学损耗随

着入射角的变化较小,即光学损耗对入射角不敏感;当入射角大于 40° 时,光学损耗随着入射角的增大而迅速增大,且双层膜的变化大于单层膜的变化,即双层膜的光学损耗对入射角更敏感;在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 范围内,双层减反膜的光学损耗明显低于单层膜。

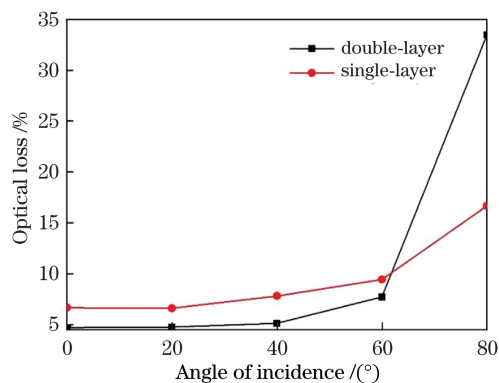


图 8 绒面硅上单层 ITO 减反膜与平面硅上 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$
双层减反膜的光学损耗随入射角的变化

Fig. 8 Changes of optical losses of single-layer ITO
antireflection film on textured silicon and $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$
double-layer antireflection film on planar
silicon with angle of incidence

太阳光照在电池板上的人射角基本在 $-60^\circ\sim 60^\circ$ 范围内,因此,在平面硅太阳能电池表面设计双层减反膜,有望代替绒面硅太阳能电池表面的单层 ITO 减反膜,这样就可以克服绒面存在的不足。

由于实际中可用作减反膜的材料不多,且减反膜材料的折射率不连续,因此需要进一步考虑薄膜材料的色散特性。此外,为了进一步降低电池的光学损耗,后期可以利用等效膜理论,通过多层膜的组合叠加获得期望的折射率,或者寻找在短波段吸收和反射损耗均较小的材料作为减反膜材料,以降低电池在短波段的吸收和反射损耗,提高电池的效率。

4 结 论

本文利用太阳能电池模拟软件 OPAL 对绒面硅异质结太阳能电池上单层 ITO 减反膜在封装前后的光学损耗进行了模拟和分析,结果表明:经玻璃封装后,太阳能电池表面 ITO 减反膜的光学损耗减小,折射率为 2.06 的 ITO 薄膜在入射介质为玻璃时的光学损耗较空气为入射介质时降低了 0.66 个百分点。这说明在进行减反膜设计时,应考虑封装玻璃的折射率对减反膜系统光学性质的影响。基于此,本文利用光学膜系设计软件 TFCalc 对平面硅上晶硅异质结太阳能电池的减反膜系与封装玻璃作为整体进行了设计优化,获得了光学损耗较绒面硅异质结太阳

电池上层 ITO 减反膜更低的 $\text{TiO}_2/\text{SiN}_x$ 双层减反膜,其光学损耗较之降低了 1.97 个百分点,而且其在短波处的吸收损耗远小于 ITO 薄膜。这说明以平面硅代替绒面硅是可行的,这也为太阳能电池的减反膜系统设计提供了一种参考。

参 考 文 献

- [1] Huang H B, Zhou L, Yue Z H, et al. Photovoltaic physics and solar cell technology[M]. Beijing: Science Press, 2020: 69-74.
黄海宾,周浪,岳之浩,等. 光伏物理与太阳能电池技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 69-74.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Tanaka M, Taguchi M, Matsuyama T, et al. Development of new a-Si/c-Si heterojunction solar cells: ACJ-HIT (artificially constructed junction-heterojunction with intrinsic thin-layer)[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1992, 31(11): 3518-3522.
- [6] Liu E K, Zhu B S, Luo J S. Physics of semiconductors[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 132-156.
刘恩科,朱秉升,罗晋生. 半导体物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 132-156.
- [7] Sun L F. Research on a new texturization method for single crystalline silicon solar cells[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 26-45.
孙林锋. 单晶硅太阳能电池表面制绒新方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 26-45.
- [8] 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): 321-327.
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): 321-327.
- [9] Gong H Y, Huang H B, Zhou L. Effects of rounding of pyramid texture on light reflectivity and amorphous silicon thin film passivation of crystalline silicon[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2015, 44(4): 913-917.
龚洪勇,黄海宾,周浪. 晶体硅金字塔绒面结构圆化对其光反射率和非晶硅薄膜钝化效果的影响[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(4): 913-917.
- [10] Jiang Y J, Zhang X D, Zhao Y. Influence of chemical polishing on performances of silicon heterojunction solar cells [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 062402.
姜元建,张晓丹,赵颖. 化学抛光对硅基异质结太阳能电池性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 062402.
- [11] Chen W. Research and application of inverted rectangular pyramid on silicon solar cells [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 33-58.
陈伟. 倒四棱锥结构在晶硅太阳能电池上的研究与应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 33-58.
- [12] Pascoe A R, Meyer S, Huang W C, et al. Enhancing the optoelectronic performance of perovskite solar cells via a textured $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ morphology [J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(8): 1278-1285.
- [13] Jaegermann W, Klein A, Mayer T. Interface engineering of inorganic thin-film solar cells-materials-science challenges for advanced physical concepts[J]. Advanced Materials, 2009, 21: 4196-4206.
- [14] Shi E, Zhang L, Li Z, et al. TiO_2 -coated carbon nanotube-silicon solar cells with efficiency of 15% [J]. Scientific Reports, 2012, 2: 884.
- [15] Li D, Kunz T, Wolf N, et al. Silicon nitride and intrinsic amorphous silicon double antireflection coatings for thin-film solar cells on foreign substrates [J]. Thin Solid Films, 2015, 583: 25-33.
- [16] Ma Q, Zhang W J, Ma D H, et al. Optimal design of quadruple-layer antireflection coating structure for conversion efficiency enhancement in crystalline silicon solar cells[J]. Optik, 2019, 177: 123-130.
- [17] 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.
- [18] Xu Y F, Zhang J, Ai L, et al. Fabrication of mesoporous double-layer antireflection coatings with near-neutral color and application in crystalline silicon solar modules[J]. *Solar Energy*, 2020, 201: 149-156.
- [19] 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.
- [20] Wahabaalla E A, El-Menyawy E M, Abdallah T, et al. Improving the photoelectrical conversion efficiency of silicon solar cells using ZnO:Al/porous silicon double antireflective layers [J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(12): 1-11.
- [21] Liu B F, Qiu S Y, Chen N, et al. Double-layered silicon nitride antireflection coatings for multicrystalline silicon solar cells [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2013, 16(3): 1014-1021.
- [22] Mahdjoub A, Zighed L. New designs for graded refractive index antireflection coatings [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 478(1/2): 299-304.
- [23] Shen W Z, Li Z P. *Physics and devices of silicon heterojunction solar cells* [M]. Beijing: Science Press, 2014: 131-133. 沈文忠, 李正平. *硅基异质结太阳能电池物理与器件* [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 131-133.
- [24] Fujiwara H, Kondo M. Effects of a-Si:H layer thicknesses on the performance of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(5): 054516.
- [25] Jensen N, Hausner R M, Bergmann R B, et al. Optimization and characterization of amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2002, 10(1): 1-13.