

文章编号:1007-2861(2004)01-0039-04

太阳能电池减反射膜设计与分析

杨文华¹, 李红波², 吴鼎祥¹

(1. 上海大学 理学院, 上海 200436; 2. 上海空间电源研究所, 上海 200233)

摘要: 根据光学薄膜原理, 利用计算机程序对太阳能电池减反射膜进行模拟仿真, 得到反射率 $R(\lambda)$ 与波长 λ 的关系曲线, 并利用曲线对减反射膜进行优化. 设计出几种常用材料制备单、双、三层减反射膜时的最佳膜系参数, 为太阳能电池减反射膜的制备提供理论依据. 分析了电池封装和电池表面钝化对反射曲线的影响, 并验证了实验结果.

关键词: 太阳能电池; 减反射膜; 反射率曲线

中图分类号: TN 305 **文献标识码:** A

Design and Analysis of Anti-Reflection Coating for Solar Cells

YANG Wen-hua¹, LI Hong-bo², WU Ding-xiang¹

(1. School of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200436, China;
2. Shanghai Space Power Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: According to the theory of optical films, a computer program is developed to simulate the anti-reflection coatings for solar cells. Reflection curves are obtained using the program. Optimization of several anti-reflection structures is realized by using the reflection curves. Parameters of single layer, double layer and three-layer anti-reflection coatings are designed. These theoretical parameters can be used to guide experiments. The influence of encapsulation and surface passivation on the reflection curves is discussed, and theoretical reflection curves have verified the experimental results.

Key words: solar cells; anti-reflection coatings; reflection curves

太阳能电池是把光能转换为电能的光电子器件. 它的光电转换效率定义为总输出功率与入射到太阳能电池表面的太阳光总功率的比值. 为提高电池的光电转换效率, 应减少电池表面光的反射损失, 增加光的透射. 目前主要采用两种方法^[1~4]: (1) 将电池表面腐蚀成绒面, 增加光在电池表面的入射次数; (2) 在电池表面镀一层或多层光学性质匹配的减反射膜. 减反射膜的设计直接影响着太阳能电池对入射光的反射率, 对太阳能电池效率的提高起着非常重要的作用. 本文将以硅太阳能电池为例, 根据光学薄膜原理^[5], 对硅太阳能电池减反射膜进行计算机仿真模

拟, 模拟出反射率 $R(\lambda)$ 与波长 λ 的关系曲线, 并利用太阳光谱和硅的光谱响应^[6]选定中心波长对曲线进行优化, 得到反射最小时的最佳膜系参数, 为高效硅太阳能电池减反射膜的制备提供了理论上的指导. 文中还给出了几种常用的减反射膜材料制备单、双、三层膜时的膜系参数, 并对太阳能电池封装和太阳能电池表面钝化对反射率变化曲线的影响进行了讨论, 应用到实际生产中, 取得了较好的效果.

1 原 理

单层减反射膜是利用光在减反射膜的两侧处反

射光存在位相差的干涉原理而达到减反射效果,可利用菲涅耳公式求得反射率.对于多层膜系,可以用一个等效界面来表示,只要求得等效导纳 Y ,就可以求得膜系的反射率.反射率 R 的计算方法如下:

已知 m 层膜系的各层膜材料的折射率和厚度分别为 $n_k, d_k (k = 1, 2, \dots, m)$, 入射介质和电池基底材料折射率分别为 n_0, n_{m+1} , 光波入射角 θ_0 , η_k 为光学导纳.第 m 层的干涉矩阵为

$$M = \prod_{k=1}^m M_k,$$

其中, M_k 为第 k 层的干涉矩阵

$$M_k = \begin{bmatrix} \cos \delta_k & i(\sin \delta_k)/\eta_k \\ i\eta_k \sin \delta_k & \cos \delta_k \end{bmatrix},$$

式中, $\delta_k = 2\pi n_k d_k \cos \theta_k / \lambda (k = 0, 1, \dots, m)$ 为位相厚度,

$$\eta_k = \begin{cases} \eta_k / \cos \theta_k & P \text{ 分量}, \\ \eta_k \cos \theta_k & S \text{ 分量}, \end{cases} \quad k = 0, 1, \dots, m,$$

而 θ_k 可由下式逐次求出:

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

一般,膜系的干涉矩阵是一个 2×2 的干涉矩阵,

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix},$$

$$\text{令} \quad \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{m+1} \end{bmatrix},$$

则等效导纳 $Y = \frac{C}{B}$, 对波长 λ 的光整个膜系的反射率为

$$R(\lambda) = \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right).$$

膜系的反射率 R 取决于上面的膜系参数.一般情况下,入射角和入射光光谱分布是已知的,因此膜系的反射率可通过调整层数 m 和各层膜的光学厚度 $n_i d_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 来得到最佳的反射率曲线.

在设计中,为简化设计的复杂性,作了以下的基本假定:(1)由于硅的吸收系数较小,可忽略消光系数的影响^[7];(2)把材料的折射率看作是恒定值,不随波长变化,即忽略材料的色散效应;(3)只考虑了入射光垂直入射到电池表面的情况.由于硅的光谱响应范围为 $300 \sim 1\,200 \text{ nm}$,所以只考虑波长在 $300 \sim 1\,200 \text{ nm}$ 范围的光的减反射.为了使硅能够吸收更多的光子,并将这些光能转换为电能,我们在设计时尽量使有最小反射率的光的波长接近电池材料的光谱响应峰值,同时也要兼顾太阳光的光谱特性.我

们考虑了太阳光谱及硅的光谱响应,把 550 nm 确定为中心波长,欲使反射率最小,就要使在中心波长 550 nm 附近的光反射率尽可能的小,同时还要兼顾在 $300 \sim 1\,200 \text{ nm}$ 范围内其它波长点光的减反射,以使得在此波长范围内光的整体反射率达到最小.

2 模拟及实验结果

2.1 在空气中反射率的变化曲线

以 $\text{MgF}_2 (n = 1.38)$ 、 $\text{SiO}_2 (n = 1.46)$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 (n = 1.9)$ 、 $\text{TiO}_2 (n = 2.3)$ 材料为例,由计算机仿真得到在空气中的反射率变化曲线(图1~4).由图1可以看出,波长一定时,随着厚度的变化反射率 R 也有较大的变化,折射率大的材料的反射率对厚度的变化更敏感,而折射率小的材料对厚度变化的依赖性要小一点.对于不同的材料,都有一个最佳的厚度值,对应着最小的反射率.由图2可以看出,对于单层膜,采用 $\text{Al}_2\text{O}_3 (n = 1.9)$,厚度 $d = 72 \text{ nm}$ 时,减反射效果比较好.但仅仅对中心波长附近的光的减反射效果较好,对远离中心波长的光的减反射效果不太理想,不能在电池的光谱响应的最大波长范围内降低反射率.图3为4种双层减反射膜的反射曲线.比较图2、3可以看出,优化后的双层膜在很大的波长范围内都有较小的反射率,在 $300 \sim 1\,200 \text{ nm}$ 波长范围内,双层膜比单层膜的减反射效果要好.此外,还设计了几种三层膜系(如图4).由图可见,三层减反射膜在较宽波长范围内有较低的反射率,与单层膜相比,三层膜系也有较好的减反射效果.由上

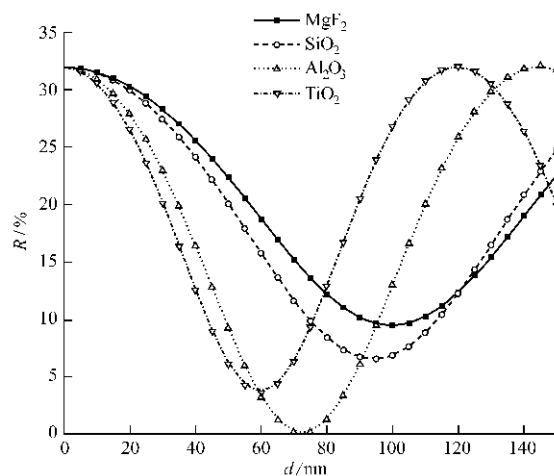


图1 单层膜反射率 R 随膜厚 d 的变化曲线(波长为 550 nm)

Fig. 1 Reflection as a function of thickness (single-layer, $\lambda = 550 \text{ nm}$)

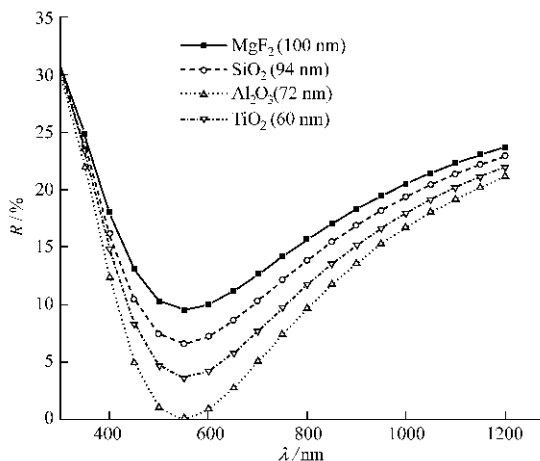
图 2 单层膜反射率 R 随波长 λ 的变化曲线

Fig. 2 Reflection as a function of wavelength (single-layer)

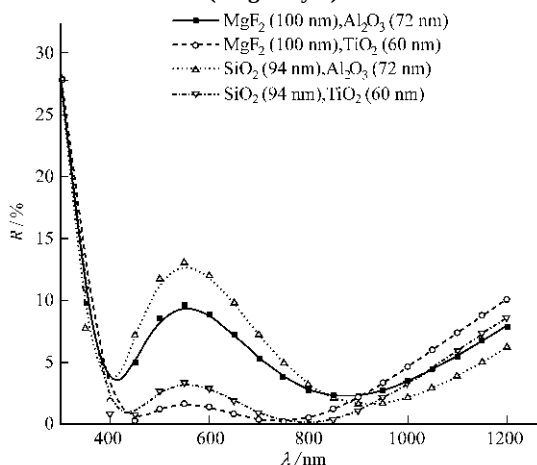
图 3 双层膜反射率 R 随波长 λ 变化曲线

Fig. 3 Reflection as a function of wavelength (double-layer)

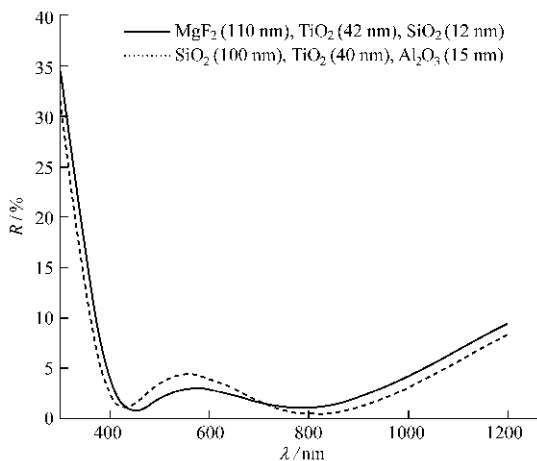
图 4 三层膜反射率 R 随波长 λ 的变化曲线

Fig. 4 Reflection as a function of wavelength (three-layer)

图可知,双层膜材料折射率一般要满足 $n_0 < n_1 < n_2 < n_3$ (n_0 、 n_3 分别为入射介质折射率、基底折射率,

n_1 、 n_2 分别为双层膜材料的折射率) 关系时,才会有较好的减射效果. 对于三层膜系,与基底相邻的材料厚度较小时,会取得较好的减反射效果.

2.2 封装后的反射率曲线的变化

一般情况下,电池都要在封装后使用. 封装后,与减反射膜相邻的入射介质为玻璃和减反射膜之间的硅胶 ($n = 1.43$),这时反射率曲线将发生变化. 这里分别给出了 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 双层膜系在电池封装前后的反射率曲线的变化 (如图 5). 显然,封装后 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 双层膜的反射曲线和单层膜的反射曲线比较相似,只在中心波长点附近有较低的反射率,不能在整个波长范围内降低反射率,减反射效果不太理想. 这是因为第一层膜 SiO_2 的折射率与入射介质硅胶的折射率相当,这使得该双层膜退化为近似的单层膜. 因此,考虑封装后,双层膜的第一层的折射率应远大于硅胶的折射率,第二层的折射率也应该增大,才会有较好的减反射效果. 结合现有的减反射膜材料,我们分别采用了 MgO ($n = 1.74$)、 CeO_2 ($n = 2.4$) 作为双层膜的顶层和底层材料. 考虑封装进行优化,得到了 MgO (80 nm)/ CeO_2 (60 nm) 双层膜系,反射曲线如图 5. 显然,与 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 双层膜相比,优化后的 MgO (80 nm)/ CeO_2 (60 nm) 双层膜反射曲线更为理想,在整个硅的光谱响应范围内有较好的减反射效果.

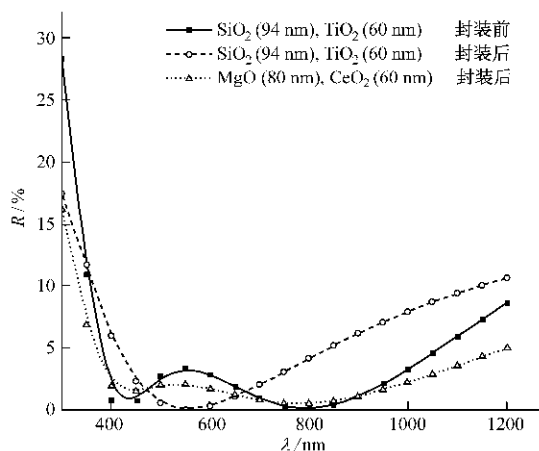
图 5 封装前、后双层膜反射率 R 随波长 λ 的变化曲线

Fig. 5 Comparison of reflections versus wavelength between encapsulation and without encapsulation (double layer)

2.3 钝化层对反射率曲线的影响

大多数太阳电池都进行表面钝化,在电池基底和减反射膜之间有一层 10 ~ 20 nm 厚的钝化层,因此原先设计的 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 双层减反射膜难以达到预

定的减反射效果. 针对这一现象, 对原来的减反射膜系进行了优化. 实验发现, 适当降低第二层 TiO_2 厚度时, 减反射效果得到改善. 表 1 为经上海空间电源研究所测试的镀膜前、后及考虑钝化层优化后太阳能电池电性能的变化. 由表 1 可看出, 与镀膜前相比, 分别镀上两种参数的减反射膜后, 开路电压提高了 1.7%, 短路电流 I_{SC} 分别提高了 42.1%、45.1%, 效率 η 分别提高了 45%、47%. 考虑钝化层后设计的膜系与没考虑钝化层设计的膜系相比, 电池的短路电流 I_{SC} 提高了 2.1%, 效率 η 提高了 1.4%.

表 1 有钝化层时减反射膜优化前后电池电性能的变化

Tab. 1 The performance variations of solar cells with passivation between antireflection coatings and without antireflection coatings

	V_{OC}/mV	I_{SC}/mA	FF	$\eta/\%$
镀膜前	600	235	0.782	10.2
镀膜后(优化前)	610	334	0.782	14.8
镀膜后(优化后)	610	341	0.782	15.0

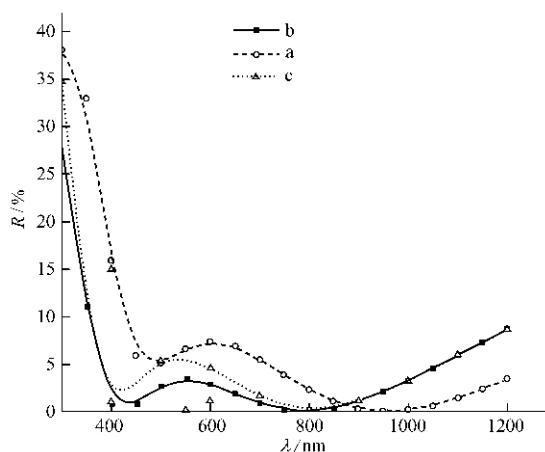


图 6 钝化层对反射曲线的影响

Fig. 6 The influence of passivation on reflection

根据这一实验结果, 我们利用计算机程序对有钝化层电池的减反射膜重新进行了理论上的优化设计, 可以把双层减反射膜看作是三层膜(钝化层为膜系的第三层)重新进行设计, 调整原先的双层膜膜系参数, 这与一般的三层膜设计的不同在于第三层膜的参数(折射率 n 、厚度 d)已经确定. 设计中, 根据所测电池的实际情况, 钝化层取为 SiO_2 ($n = 1.46$, $d = 15 \text{ nm}$), 故原来的 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 双层膜变为 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (15 nm) 三层膜. 图 6 中曲线 a 为 SiO_2 (94 nm)/ TiO_2 (60 nm) 双层膜应用在无钝化层的电池上的反射率曲线. 对于有钝化层的电池, SiO_2 (94 nm)/ TiO_2 (60 nm) 双层膜实际上变为 SiO_2 (94 nm)/ TiO_2 (60 nm)/ SiO_2 (15 nm) 三层膜, 此时

反射率曲线为曲线 b, 显然, 减反射效果不太理想. 于是我们改变了原来的 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 双层膜的参数得到 SiO_2 (94 nm)/ TiO_2 (40 nm)/ SiO_2 (15 nm) 三层膜曲线 c. 由曲线 b、c 可以看出, 当把第二层膜 TiO_2 厚度由 60 nm 降低到 40 nm 时, 反射率有所下降. 这与实验中的适当降低第二层膜厚度会改善减反射效果的结果一致.

3 结 论

本文对硅太阳能电池减反射膜进行了优化设计. 利用计算机对硅太阳能电池的减反射膜进行了仿真模拟, 根据反射率曲线得到了最佳的减反射膜膜系参数, 解决了封装和钝化层对减反射膜的影响. 考虑封装后, 优化得到 MgO (80 nm)/ CeO_2 (60 nm) 双层减反射膜有较好的减反射效果. 有钝化层时, 把 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 双层减反射膜看作 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (15 nm) 三层减反射膜重新进行优化设计, 给出了优化的膜系参数, 为实验结果提供了理论的依据. 此外, 本文所设计的程序和减反射膜的优化设计方法, 对于其它材料的太阳能电池也是适用的.

参考文献:

- [1] Pierre Vcrlinden, et al. The surface texturization of solar cells: A new mited using V-grooves with controllable side-wall angles [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992, **26**(1/2): 71 - 78.
- [2] Zhao J, Green M A. Optimized antireflection coatings for high-efficiency silicon solar cells [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1991, **38** (8): 1925 - 1934.
- [3] Chakravarty B C, Vinod P N, Singh S N. Design and simulation of antireflection coationg for application to silicon solar cells [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2002, **73**(1): 59 - 66.
- [4] Lee S E, Choi S W, Yi J. Double-layer anti-reflection coating using MgF_2 and CeO_2 films on a crystalline silicon substrate [J]. *Thin Solid Films*, 2000, **376**: 208 - 213.
- [5] 林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990. 35 - 40.
- [6] 刘恩科, 等. 光电池及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1989. 106 - 107.
- [7] 王履芳, 陈庭金. 半导体太阳能电池减反射膜的最佳光学匹配 [J]. 云南师范大学学报, 1992, **12**(2): 71 - 74.

(编辑: 陈海清)