

# 空间高效硅太阳电池减反射膜设计与数值分析

杨文华<sup>1</sup> 吴鼎祥<sup>1</sup> 李红波<sup>2</sup>

(1 上海大学物理系, 上海 200436)

(2 上海空间电源研究所, 上海 200233)

**摘要:** 结合 AMO 太阳光谱特性对空间硅太阳电池的减反射膜进行了设计分析, 得到了最小反射时的最佳膜厚。分别讨论了单、双、三层减反射膜厚度变化对反射率的影响, 并对有钝化层的  $\text{SiO}_2(94\text{nm})/\text{TiO}_2(60\text{nm})$  双层减反射膜进行了优化设计, 优化后硅太阳电池的短路电流和效率分别提高了 2.1% 和 1.4%。

**关键词:** 空间硅太阳电池; 减反射膜; 反射率; 反射曲线

**PACC:** 7865H

中图分类号: TN 304

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)09-1118-05

## 1 引言

硅太阳电池是一种把光能转换为电能的半导体光电器件, 其光电转换效率的提高是长期以来人们一直致力解决的问题, 而影响太阳电池效率的一个重要因素就是入射到器件表面上光的反射损失。减反射膜的设计已成为太阳电池设计的关键因素<sup>[1]</sup>, 设计减反射膜的主要问题是计算减反射膜的折射率和膜层的厚度, 使得电池在所工作的光谱范围内获得最佳的减反射效果。减反射膜的设计还依赖于电池材料的光谱响应及所工作的光谱特性, 对于空间高效硅太阳电池应结合硅材料的光谱响应和 AMO 太阳光谱特性<sup>[2]</sup> 进行减反射膜的设计。国内外虽有很多关于太阳电池减反射膜的研究<sup>[3~6]</sup>, 但没有对减反射膜厚度变化对反射率的影响作过详细、系统的讨论。本文介绍了如何通过减少光的反射损失来获得空间高效的硅太阳电池, 根据最小加权平均反射率及反射曲线, 给出了各种单、双、三层减反射膜的最佳厚度值, 详细讨论了减反射膜膜层厚度变化对反射率的影响, 进行了数值分析, 还讨论了钝化层对反射率的影响, 为空间硅太阳电池减反射膜的制备提供了理论上的依据。

## 2 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, 可以在其中任取一层, 把上面各层膜等效为一个界面, 把下面各层膜也等效为一个界面, 则整个系统等效为一个单层膜, 可求出多层膜系的等效菲涅耳系数, 从而求出反射率。在讨论中如果引入光学导纳( $Y$ )的概念来分析多层光学薄膜的反射性质是很方便的<sup>[7]</sup>。这时对折射率为  $n_0$  的入射介质和把  $m$  层连同基底一起等效为一个新基体的界面套用菲涅耳公式, 则可得到多层介质膜的反射系数  $r$ ,  $r = (n_0 - Y)/(n_0 + Y)$ , 而反射率为

$$R = |r|^2 = \left| \frac{n_0 - Y}{n_0 + Y} \right|^2$$

式中  $Y = C/B$ , 可由下述等效光学导纳的特征表达式得到

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} &= \left[ \prod_{k=1}^m \begin{bmatrix} \cos\delta_k & i(\sin\delta_k)/n_k \\ i\eta_k \sin\delta_k & \cos\delta_k \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix} \end{aligned}$$

式中  $2\delta_k$  等于相邻两相干光束的位相差,  $\delta_k =$

杨文华 男, 1979 年出生, 硕士研究生, 从事半导体光电器件研究。  
2003-09-10 收到, 2004-02-05 定稿

$2\pi n_k d_k / \lambda$ . 以上给出的公式为垂直入射光的情况.

膜系的反射率  $R$  取决于上面的膜层结构参数. 一般情况下, 垂直入射和入射光的光谱分布是已知的, 因此可通过调整膜系的层数  $m$  和各层膜的光学厚度  $n_i d_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 来得到最小的反射率.

太阳光分布在一个较大的波长范围内, 因此, 对太阳电池要求在一个较宽的光谱范围内有良好的减反射效果, 使更多入射光能进入电池. 考虑到硅材料的内部量子效率, 光伏应用的硅太阳电池需要在所有的可见光谱(300~1100nm)范围内有一个最小的反射率. 为使硅能吸收更多的光子, 并将这些光能转换为电能, 在减反射膜设计中, 考虑硅材料的内部量子效率的同时还要兼顾太阳光的光谱特性, 对于空间用太阳电池考虑的是 AM0 太阳光谱. 于是, 由单个波长点反射率、入射光子通量、硅材料的内部量子效率, 可计算出在整个光谱范围内的加权平均反射率<sup>[8]</sup>:

$$R_w = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) Q(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) Q(\lambda) d\lambda}$$

式中  $F(\lambda)$  为入射光子通量;  $Q(\lambda)$  为硅的内部量子效率;  $R(\lambda)$  为减反射膜在对应波长点的反射率;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  为光谱波长上下限,  $\lambda_1 = 300\text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 1100\text{nm}$ .

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 单层减反射膜

我们分别利用计算机程序模拟了  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  单层膜的反射率曲线及最佳的膜层厚度, 如图 1 所示. 当膜层厚度分别为 110, 105, 67nm 时有最小的加权平均反射率,  $R_{w\min} = 13.22\%$ ,  $10.87\%$ ,  $8.52\%$ . 图 2 给出了三种单层膜在 AM0 光谱下的加权平均反射率  $R_w$  随膜层厚度的变化曲线. 对于折射率较低的  $\text{MgF}_2$  和  $\text{SiO}_2$  材料, 厚度的少许变化对  $R_w$  的影响较小; 而折射率较高的  $\text{TiO}_2$  膜,  $R_w$  对厚度的变化更加敏感, 特别是在最佳膜厚附近 10nm 范围内变化时. 计算得出, 对于  $\text{MgF}_2$  和  $\text{SiO}_2$  减反射膜,  $R_w$  分别有 0.38%, 0.4% 的波动, 而对于  $\text{TiO}_2$  则约有 1% 的波动, 这就对采用高折射率材料做减反射膜的制备工艺条件提出了更高的要求, 也就是说, 对减反射膜厚度的控制提出了更高的要求.

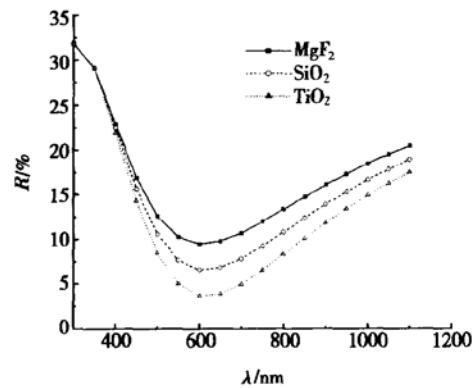


图 1 单层膜反射率随波长的变化曲线

Fig. 1 Reflectance as a function of wavelength (single layer)

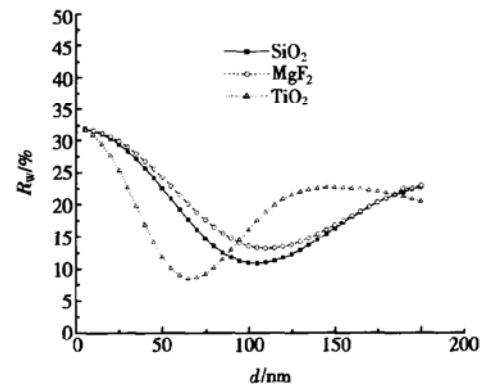


图 2 单层膜加权平均反射率随膜厚的变化曲线

Fig. 2 Weighted reflectance as a function of thickness (single layer)

#### 3.2 双层减反射膜

图 3 分别给出了  $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  双层膜在最佳膜层厚度时的反射率随波长的变化曲线. 对于  $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$  双层膜, 膜厚  $d(\text{MgF}_2) = 100\text{nm}$ ,  $d(\text{TiO}_2) = 62\text{nm}$  时, 有最小的加权平均反射率  $R_{w\min} = 1.23\%$ ; 对于  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  双层膜, 膜厚  $d(\text{SiO}_2) = 94\text{nm}$ ,  $d(\text{TiO}_2) = 61\text{nm}$  时,  $R_{w\min} = 1.6\%$ . 可见, 双层减反射膜比单层膜具有更好的减反射效果, 性能好的双层膜能把  $R_w$  降低到 2% 以下, 而单层膜只能把  $R_w$  降低到 10% 左右. 图 4 分别给出了  $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$  双层膜在  $\text{TiO}_2$  层厚度不变,  $\text{MgF}_2$  层厚度变化; 以及  $\text{MgF}_2$  层厚度不变,  $\text{TiO}_2$  层厚度变化对加权平均反射率  $R_w$  的影响. 由图 4 可以看出折射率低的  $\text{MgF}_2$  层厚度变化对  $R_w$  的影响较小, 而折射

率较大的  $\text{TiO}_2$  层厚度变化对  $R_w$  的影响较大。计算得出, 对于  $\text{MgF}_2$  层, 当膜厚在其最佳厚度值附近 10nm 范围内变化时,  $R_w$  有约 0.2% 的波动, 而对于  $\text{TiO}_2$  层  $R_w$  则有约 0.7% 的波动, 与图 2 比较可知单层膜加权平均反射率对膜层厚度变化的敏感性比双层膜要大。

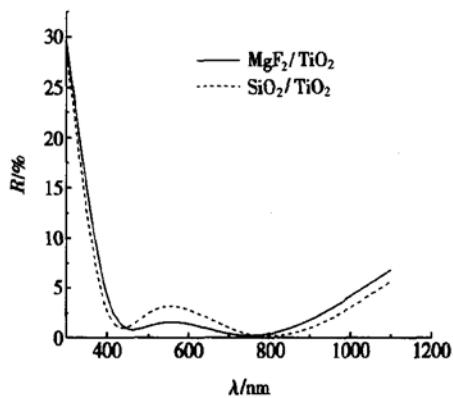


图 3 双层膜反射率随波长的变化曲线

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

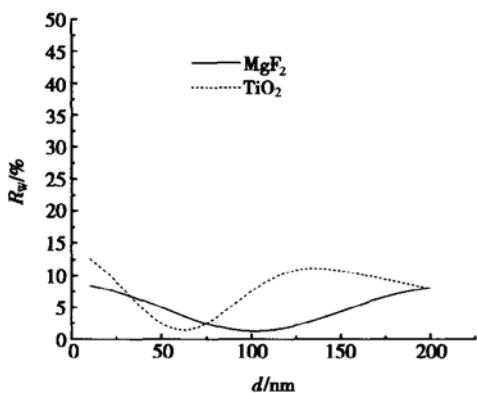


图 4 双层膜加权平均反射率随膜厚的变化曲线

Fig. 4 Weighted reflectance as a function of thickness(double layer)

### 3.3 三层减反射膜

图 5 给出了  $\text{MgF}_2(102\text{nm})/\text{TiO}_2(49\text{nm})/\text{SiO}_2$  三层减反射膜随  $\text{SiO}_2$  层厚度变化的反射率曲线, 在三维坐标中  $\text{SiO}_2$  厚度是变化的参数。当  $\text{SiO}_2$  层厚度为 10nm 时, 此三层膜有最小的加权平均反射率,  $R_{w\min} = 1.55\%$ 。随着  $\text{SiO}_2$  层厚度的增加, 反射率最小点逐渐向长波方向移动, 短波方向及可见光区的反射率越来越大, 这使得减反射效果越来越差。计算

得出, 当  $\text{SiO}_2$  层厚度分别变为 15, 20, 25, 30nm 时,  $R_w$  的值分别为 2.31%, 3.81%, 5.91%, 8.46%, 可见随  $\text{SiO}_2$  层厚度的增加, 加权平均反射率  $R_w$  也在逐渐增加, 减反射效果不理想。

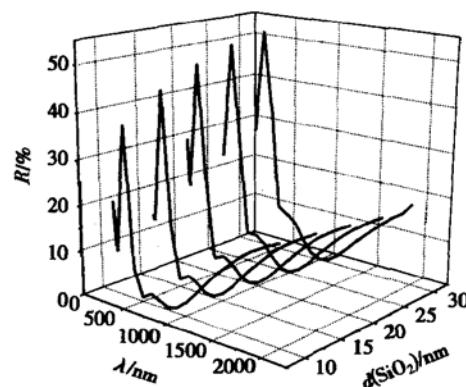
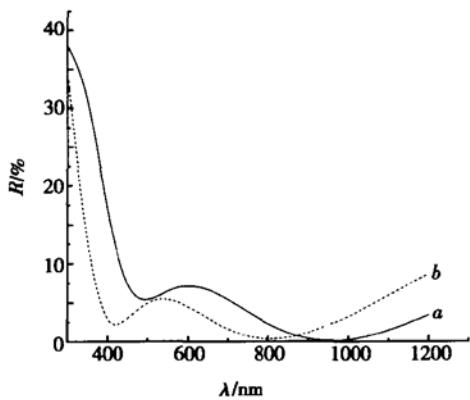


图 5  $\text{MgF}_2(102\text{nm})/\text{TiO}_2(49\text{nm})/\text{SiO}_2$  三层减反射膜时反射率随  $\text{SiO}_2$  层厚度的变化曲线

Fig. 5 Reflectivity of a three-layer  $\text{MgF}_2(102\text{nm})/\text{TiO}_2(49\text{nm})/\text{SiO}_2$  antireflection coatings as a function of  $\text{SiO}_2$  thickness

### 3.4 有钝化层减反射膜的优化

由于太阳电池要进行表面钝化, 原先设计的减反射膜将难以达到预定的减反射效果, 我们考虑了有钝化层时  $\text{SiO}_2(94\text{nm})/\text{TiO}_2(60\text{nm})$  双层减反射膜的优化, 并利用计算机程序对有钝化层的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)进行设计, 调整原先的双层膜膜系参数, 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, 钝化层为  $\text{SiO}_2(d=15\text{nm})$ , 原来的  $\text{SiO}_2(94\text{nm})/\text{TiO}_2(60\text{nm})$  双层膜实际上变为  $\text{SiO}_2(94\text{nm})/\text{TiO}_2(60\text{nm})/\text{SiO}_2(15\text{nm})$  三层膜, 计算得此时加权平均反射率  $R_w = 5.14\%$ , 反射率曲线为图 6 中曲线  $a$ , 显然, 减反射效果不太理想。优化后发现, 当把第二层膜  $\text{TiO}_2$  厚度由 60nm 降低到 40nm 时, 可得到最小的加权平均反射率,  $R_w = 2.65\%$ , 而改变第一层  $\text{SiO}_2$  厚度时反射率却增大。通过计算比较, 我们把原来的  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  双层膜改为  $\text{SiO}_2(94\text{nm})/\text{TiO}_2(40\text{nm})/\text{SiO}_2(15\text{nm})$  三层膜系, 于是得到图 6 中反射率曲线  $b$ 。由曲线  $a$ ,  $b$  可以看出, 曲线  $b$  减反射效果优于曲线  $a$ , 原因是与曲线  $a$  相比, 曲线  $b$  改善了短波方向的减反射效果, 使得总的加权平均反射率下降了。

图 6 钝化层对  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  双层膜反射曲线的影响Fig. 6 Influence of passivation on reflection curves of  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  double layer antireflection coatings

实验发现,当考虑了钝化层,降低第二层  $\text{SiO}_2$  厚度后,电池的性能有了明显的改善。在 AM0 光谱条件下,对  $2.0\text{cm} \times 4.0\text{cm}$  的电池测试得出,电池的短路电流由 334mA 提高到 341mA,效率由 14.8% 提高到 15.0%,增益分别为 2.1% 和 1.4%。

## 4 结论

利用计算机仿真模拟对空间硅太阳电池减反射膜进行了设计,给出了反射率最小时减反射膜的最优化厚度及反射曲线。通过对减反射膜膜层厚度的变化对加权平均反射率  $R_w$  影响的分析,发现折射率大的减反射膜材料厚度的变化对  $R_w$  影响较大,而折射率小的材料厚度变化对  $R_w$  的影响较小。与单层膜相比,双层膜厚度的变化对加权平均反射率的影响较小。还分析了  $\text{MgF}_2$  (102nm)/ $\text{TiO}_2$  (49nm)/ $\text{SiO}_2$  三层减反射膜第三层  $\text{SiO}_2$  厚度变化对  $R_w$  的影响,  $R_w$  随着  $\text{SiO}_2$  层厚度的增加而增加。在减反射膜的制造中,应结合制造工艺,精确控制膜

层厚度,使实际的膜层厚度与理论计算的最优厚度间的误差达到最小,以得到最佳的减反射效果。对有钝化层时的减反射膜进行了优化设计后,硅太阳电池的短路电流和效率分别提高了 2.1% 和 1.4%。

## 参考文献

- [1] Chen Tingjin, Liu Zuming, Wang Lufang. The upper limit of the ratio of short-circuit photo current increment of solar cells with and without ARC. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2000, 21(3): 269 [陈庭金, 刘祖明, 王履芳. 太阳电池有无减反射膜的短路光电流增量比上限. 太阳能学报, 2000, 21(3): 269]
- [2] Liu Enke, et al. The theory and applications of photocells. Beijing: Science Press, 1989: 30 [刘恩科, 等. 光电池及其应用. 北京: 科学出版社, 1989: 30]
- [3] Wang Yongdong, Cui Rongqiang, Xu Xiuqin. Optimized design of antireflection coatings for solar cells. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2001, 22(3): 317 [王永东, 崔容强, 徐秀琴. 太阳电池减反射膜系统的研究. 太阳能学报, 2001, 22(3): 317]
- [4] Nubile P. Analytical design of antireflection coatings for silicon photovoltaics. *Thin Solid Films*, 1999, 342: 257
- [5] Cid M, Stem N, Brunetti C, et al. Improvements in anti-reflection coatings for high-efficiency silicon solar cells. *Surface Coatings Technology*, 1998, 106: 117
- [6] Lee S E, Choi S W, Yi J. Double-layer anti-reflection coating using  $\text{MgF}_2$  and  $\text{CeO}_2$  films on a crystalline silicon substrate. *Thin Solid Films*, 2000, 376: 208
- [7] Lin Yongchang, Lu Weiqiang. Principles of optical films. Beijing: National Defense Industry Press, 1990: 35 [林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理. 北京: 国防工业出版社, 1990: 35]
- [8] Bouhafs D, Moussi A, Chikouche A, et al. Design and simulation of antireflection coating systems for optoelectronic devices: Application to silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1998, 52: 79

## Design and Numerical Analysis of Anti-Reflection Coating for Space High-Efficiency Si Solar Cells

Yang Wenhua<sup>1</sup>, Wu Dingxiang<sup>1</sup> and Li Hongbo<sup>2</sup>

(1 Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200436, China)

(2 Shanghai Space Power Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** According to AM0 solar spectrum, antireflection coatings of space Si solar cells are designed and analysed. When reflection coefficient is the lowest, the optimal thickness of coating is obtained. The influence of coating thickness variation on reflection coefficient is discussed. SiO<sub>2</sub>(94nm)/TiO<sub>2</sub>(60nm) double layer antireflection coating with passivating coating is optimized. After optimizing, short-circuit current and efficiency are improved by 2.1% and 1.4%, respectively.

**Key words:** space Si solar cells; antireflection coating; reflection coefficient; reflection curves

**PACC:** 7865H

**Article ID:** 0253-4177(2004)09-1118-05

Yang Wenhua male, was born in 1979, postgraduate. He is engaged in research on semiconductor photoelectric devices.

Received 10 September 2003, revised manuscript received 5 February 2004

© 2004 The Chinese Institute of Electronics