

# 新型空间硅太阳能电池纳米减反射膜系的优化设计\*

刘永生<sup>1)†</sup> 杨文华<sup>2)</sup> 朱艳燕<sup>1)</sup> 陈 静<sup>1)</sup> 杨正龙<sup>3)</sup> 杨金焕<sup>1)</sup>

1) 上海电力学院太阳能研究所, 上海 200090)

2) 合肥工业大学应用物理系, 合肥 230009)

3) 同济大学功能高分子材料研究所, 上海 200092)

(2008 年 8 月 10 日收到, 2008 年 9 月 22 日收到修改稿)

结合纳米材料折射率(小于 1.4)和 AMO 太阳光谱特性,对空间硅太阳能电池的减反射膜进行了设计分析.分别设计了常规材料和纳米材料的双层、三层减反射膜,得到了最佳的膜系参数,并作出了反射率变化曲线.结果发现,采用低折射率纳米材料的三层减反射膜有着更好的减反射效果.新型纳米减反射膜系与采用常规材料的减反射膜系相比,优化后的最小加权平均反射率减小了 15%(双层减反射膜)和 24.5%(三层减反射膜).

关键词: 折射率, 减反射膜, 纳米材料, 空间硅太阳能电池

PACC: 7865, 8630J, 4280Y

## 1. 引 言

太阳能电池是一种把光能转换为电能的半导体光电器件,它的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<sup>[1,2]</sup>.影响太阳能电池效率的一个重要因素是入射到器件表面上光的反射损失,因而减反射膜的设计已成为太阳能电池设计的研究热点之一.设计减反射膜的主要目的是通过选择最佳的减反射膜材料进行膜系组合,并采用最佳的膜层的厚度,以使得电池在所工作的光谱范围内获得最佳的减反射效果<sup>[3]</sup>.但由于常规减反射膜材料折射率的限制,使得现在常用的太阳能电池用减反射膜的减反射效果被削弱.这是因为,一般常规的减反射膜材料的折射率都大于 1.4.而随着纳米技术的发展,使得制备具有奇异物性的材料成为可能,如可以获得折射率在 1.4 以下的纳米材料<sup>[4-6]</sup>.国内外虽有很多关于太阳能电池减反射膜的研究<sup>[7-10]</sup>,但没有对减反射膜厚度、折射率变化对反射率的影响作过详细、系统的讨论,特别缺乏对低折射率材料(小于 1.4)的研究.本文介绍了怎样通过减少光的反射损失来获得空间高效的硅太阳能电池,根据最小加权平均反

射率及反射曲线,给出了多种双、三层减反射膜的最佳厚度值,讨论了减反射膜膜层厚度、低折射率变化对反射率的影响,进行了数值分析,为空间硅太阳能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,也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方便的<sup>[11]</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

\* 上海市纳米科技专项(批准号 0752nm012, 0852nm02400, 0952nm02700),国家自然科学基金(批准号:10804072, 50703029, 10774097),上海市青年科技启明星计划(批准号 07QA14026),上海市基础研究重点项目(批准号 08JC1410400),上海市科委重大项目(批准号 071605123, 061612042)和上海市晨光计划(批准号 2008CG60)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: yslu@shiep.edu.cn

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,  $\delta_k = 2\pi n_k d_k / \lambda$ . 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, 对于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, 对太阳能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, 光伏应用的硅太阳能电池需要在所有的可见光谱(300—1100 nm)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, 对于空间用太阳能电池考虑的是 AMO 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>[12]</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. 常规材料双层减反射膜

我们分别利用计算机程序模拟了常规折射率材料  $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  双层膜在最佳膜层厚度时的反射率随波长的变化曲线, 如图 1 所示. 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, 组合好的纳米尺度的常规材料双层膜已取得了较好的减反射效果.

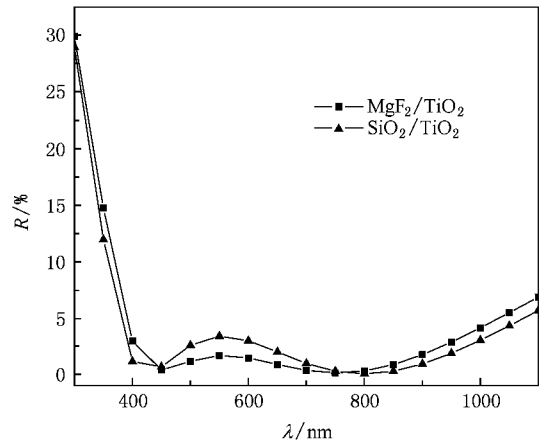


图 1 常规折射率材料最佳双层膜  $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  反射率  $R$  随波长  $\lambda$  变化曲线

#### 3.2. 新型纳米材料双层减反射膜

为了更进一步的降低入射光的反射率, 我们采用低折射率的新型纳米材料作为减反射膜材料进行了优化设计. 对于双层膜, 分别采用了三种不同折射率的纳米材料优化设计了三种不同的减反射膜系, 减反射效果也不同. 图 2 给出了优化的三种双层减反射膜的反射率随波长的变化曲线.  $n_1$  为第一层低折射率纳米材料的折射率,  $d_1$  为其厚度,  $n_2$  为第二层材料折射率, 采用的材料是  $\text{TiO}_2$ ,  $d_2$  为第二层材料厚度.  $R_w$  是计算得到的加权平均反射率. 曲线 B 的优化膜系参数为  $n_1 = 1.1$ ,  $d_1 = 133 \text{ nm}$ ,  $n_2 = 2.3$ ,  $d_2 = 66 \text{ nm}$ , 计算得出加权平均反射率为  $R_w = 4.74\%$ . 曲线 C 的优化膜系参数为  $n_1 = 1.2$ ,  $d_1 = 121 \text{ nm}$ ,  $n_2 = 2.3$ ,  $d_2 = 65 \text{ nm}$ , 计算得出加权平均反射率为  $R_w = 2.43\%$ . 曲线 D 的优化膜系参数为  $n_1 = 1.3$ ,  $d_1 = 110 \text{ nm}$ ,  $n_2 = 2.3$ ,  $d_2 = 64 \text{ nm}$ , 计算得出加权平均反射率为  $R_w = 1.36\%$ .

由图可以看出, 三个曲线在 600 nm 波长附近均有最小的反射率, 而曲线 D 在各个波长点的反射率均比曲线 B, C 低, 因此曲线 D 具有最佳的减反射效果. 与采用常规材料的双层膜的设计结果相比较, 曲线 D 的加权平均反射率更低, 利用 D 的优化膜系参数的纳米减反射膜比常规的减反射膜具有更好的减反射效果. 计算可知, 与常规双层减反射膜相比, 优化的纳米减反射膜最小加权平均反射率降低了 15%.

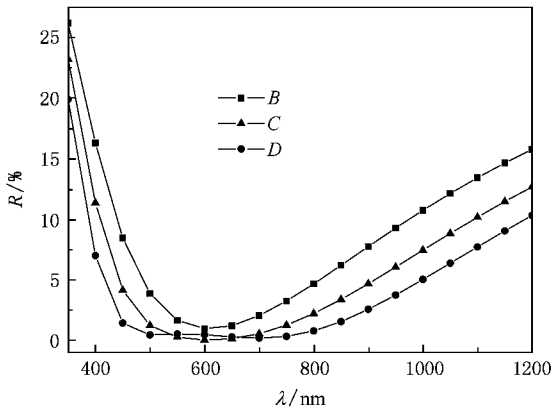


图2 新型纳米材料双层减反射膜反射率随波长变化曲线(曲线  $B$   $n_1 = 1.1$ ,  $d_1 = 133$  nm,  $n_2 = 2.3$ ,  $d_2 = 66$  nm;  $C$   $n_1 = 1.2$ ,  $d_1 = 121$  nm,  $n_2 = 2.3$ ,  $d_2 = 65$  nm;  $D$   $n_1 = 1.3$ ,  $d_1 = 110$  nm,  $n_2 = 2.3$ ,  $d_2 = 64$  nm)

### 3.3. 常规材料三层减反射膜

图3给出了常规折射率材料  $MgF_2$  (102 nm) /  $TiO_2$  (49 nm) /  $SiO_2$  三层减反射膜的  $SiO_2$  层厚度变化时的反射率变化曲线,在三维坐标中  $SiO_2$  厚度是变化的参数,当  $SiO_2$  层厚度为 10 nm 时,此三层膜有最小的加权平均反射率,  $R_w = 1.55\%$ . 随着  $SiO_2$  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  $SiO_2$  层厚度分别变为 15 nm, 20 nm, 25 nm, 30 nm 时,  $R_w$  的值分别为 2.31% 3.81% 5.91% 8.46%, 可见随  $SiO_2$  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.

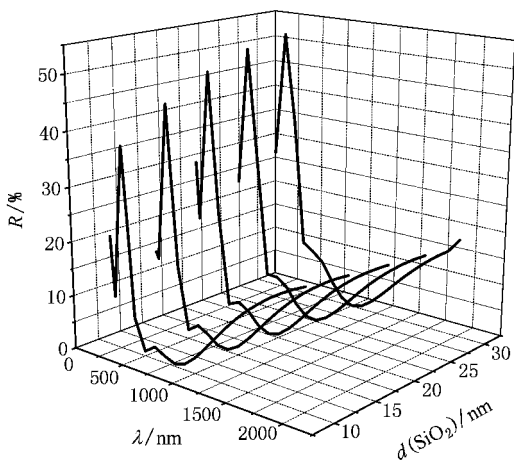


图3 常规折射率材料  $MgF_2$  (102 nm) /  $TiO_2$  (49 nm) /  $SiO_2$  三层膜时反射率随  $SiO_2$  层厚度的变化曲线

### 3.4. 新型纳米材料三层减反射膜

对于三层膜,也分别采用了三种不同低折射率的纳米材料优化设计了三种不同的减反射膜系. 图4为优化的三种双层减反射膜的反射率随波长的变化曲线. 三种膜系参数分别为,曲线  $E$  的优化膜系参数为  $n_1 = 1.1$ ,  $d_1 = 96$  nm,  $n_2 = 1.46$ ,  $d_2 = 85$  nm,  $n_3 = 2.3$ ,  $d_3 = 61$  nm, 计算得出加权平均反射率为  $R_w = 1.17\%$ . 曲线  $F$  的优化膜系参数为  $n_1 = 1.2$ ,  $d_1 = 59$  nm,  $n_2 = 1.46$ ,  $d_2 = 76$  nm,  $n_3 = 2.3$ ,  $d_3 = 60$  nm, 计算得出加权平均反射率为  $R_w = 1.25\%$ . 曲线  $G$  的优化膜系参数为  $n_1 = 1.3$ ,  $d_1 = 66$  nm,  $n_2 = 1.46$ ,  $d_2 = 50$  nm,  $n_3 = 2.3$ ,  $d_3 = 60$  nm, 计算得出加权平均反射率为  $R_w = 1.21\%$ .

由图可以看出,三个曲线在 450 nm 和 800 nm 波长附近分别有较小的反射率,三种膜系均有很好的减反射效果. 与采用常规材料的三层膜的设计结果相比较,采用纳米材料的三层膜加权平均反射率更低,采用纳米材料的三层膜的减反射效果明显优于常规材料减反射膜,加权平均反射率降低了 24.5%. 此外,对于常规材料,三层膜的加权平均反射率比双层膜高,而采用低折射率的纳米材料后,三层膜加权平均反射率比双层膜低,减反射效果明显得到改善.

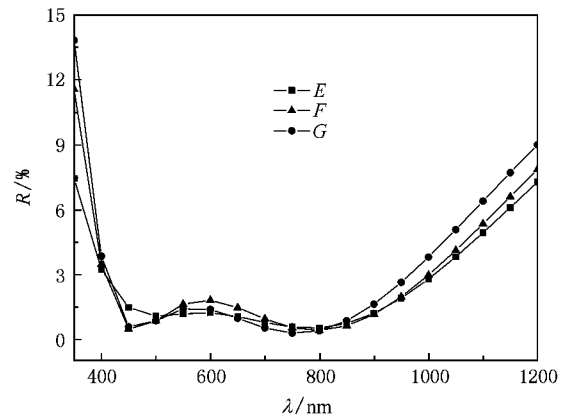


图4 新型纳米材料三层减反射膜反射率随波长变化曲线(曲线  $E$   $n_1 = 1.1$ ,  $d_1 = 96$  nm,  $n_2 = 1.46$ ,  $d_2 = 85$  nm,  $n_3 = 2.3$ ,  $d_3 = 61$  nm;  $F$   $n_1 = 1.2$ ,  $d_1 = 59$  nm,  $n_2 = 1.46$ ,  $d_2 = 76$  nm,  $n_3 = 2.3$ ,  $d_3 = 60$  nm;  $G$   $n_1 = 1.3$ ,  $d_1 = 66$  nm,  $n_2 = 1.46$ ,  $d_2 = 50$  nm,  $n_3 = 2.3$ ,  $d_3 = 60$  nm)

图5为改变了第二层材料的三层减反射膜的反射率变化曲线. 第一层为低折射率的纳米材料,折射

率为 1.1, 第三层仍然为  $\text{TiO}_2$ , 我们把第二层材料变为折射率较低的  $\text{MgF}_2$ . 优化得到, 此膜系的第一、二、三层厚度分别为 56 nm, 91 nm, 62 nm 时, 具有最小加权平均反射率,  $R_w = 1.18\%$ , 可见, 此三层膜系也具有很好的减反射效果.

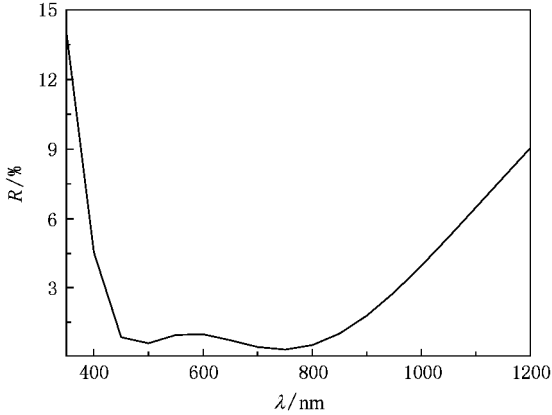


图 5 改变了第二层材料的新型纳米材料三层减反射膜的反射率变化曲线 ( $n_1 = 1.1$ ,  $d_1 = 56$  nm,  $n_2 = 1.38$ ,  $d_2 = 91$  nm,  $n_3 = 2.3$ ,  $d_3 = 62$  nm)

## 4. 结 论

本文通过计算机仿真模拟对空间硅太阳能电池减反射膜进行了设计, 分别设计了常规折射率材料的双、三层膜和采用低折射率纳米材料的双、三层膜, 优化出了最佳的膜系参数, 分别作出了它们的反射曲线, 计算得到了最小的加权平均反射率. 通过对常规材料和纳米低折射率材料的减反射膜设计结果比较可知, 采用纳米材料的减反射膜, 不论双层、三层减反射膜比常规的减反射膜有着更好的减反射效果, 与采用常规材料的减反射膜系相比, 新型纳米减反射膜系优化后的最小加权平均反射率减小了 15% (双层减反射膜) 和 24.5% (三层减反射膜). 低折射率新型纳米材料可以进一步降低入射光在电池表面的反射, 从而提高电池的转换效率. 本文模拟设计得到的膜系参数对下一步的高效低折射率纳米减反射膜系的制备具有重要的指导意义.

[ 1 ] Hu L H, Dai S Y, Wang K J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1914 (in Chinese) [ 胡林华、戴松元、王孔嘉 2005 物理学报 **54** 1914 ]  
 [ 2 ] Feng W, Gao Z K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2567 (in Chinese) [ 封伟、高中扩 2008 物理学报 **57** 2567 ]  
 [ 3 ] Cheng T J, Liu Z M 2000 *Acta Energetica Solaris Sinica* **21** 269 (in Chinese) [ 陈庭金、刘祖明 2000 太阳能学报 **21** 269 ]  
 [ 4 ] Xi J, Kim J, Schubert E 2005 *Nano Lett.* **5** 1385  
 [ 5 ] Schubert M, Xi J, Kim J, Schubert E 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 141115  
 [ 6 ] Kim J, Chhajed S, Schubert M *et al* 2008 *Adv. Mater.* **20** 801  
 [ 7 ] Wang Y D, Cui R Q, Xu X Q 2001 *Acta Energetica Solaris Sinica* **22**

317 (in Chinese) [ 王永东、崔容强、徐秀琴 2001 太阳能学报 **22** 317 ]  
 [ 8 ] Nubile P 1999 *Thin Solid Films* **342** 257  
 [ 9 ] Shang S Z, Chen L, Hou H H *et al* 2005 *Appl. Surf. Sci.* **242** 437  
 [ 10 ] Zhang F, Zhu H L, Yang W F *et al* 2008 *Appl. Surf. Sci.* **254** 3045  
 [ 11 ] Lin Y C, Lu W Q 1990 *Principles of optical films* (Beijing: National Defense Industry Press) 35 (in Chinese) [ 林永昌、卢维强 1990 光学薄膜原理 (北京: 国防工业出版社) 第 35 页 ]  
 [ 12 ] Balenzategui J, Chenlo F 2005 *Solar Energy Materials and Solar Cells* **86** 53



# Design of new nano anti-reflection coating for space silicon solar cells<sup>\*</sup>

Liu Yong-Sheng<sup>1)†</sup> Yang Wen-Hua<sup>2)</sup> Zhu Yan-Yan<sup>1)</sup> Chen Jing<sup>1)</sup> Yang Zheng-Long<sup>3)</sup> Yang Jin-Huan<sup>1)</sup>

1) *Institute of Solar Energy, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China*

2) *Department of Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*

3) *Institute of Functional Polymer Materials, Tongji University, Shanghai 200092, China*

(Received 10 August 2008; revised manuscript received 22 September 2008)

## Abstract

According to refractive indexes of nanomaterials (less than 1.4) and the AMO solar spectrum, antireflection coatings of space Si solar cells are designed and analyzed. For double-layer and tri-layer antireflection coatings fabricated by normal and nanometer materials, the optimal parameters of coatings and reflection coefficient curves are obtained. The double-layer and tri-layer new nano antireflection coatings are optimized, and have better antireflection compared with those fabricated using the normal materials. It is interesting that, after optimizing, the minimal weighted reflectance of the new nano antireflection coatings is 15% and 24.5% less than that of the normal antireflection coatings for the double-layers and the tri-layers, respectively.

**Keywords:** refractive index, antireflection coating, nanomaterial, space Si solar cells

**PACC:** 7865, 8630J, 4280Y

<sup>\*</sup> Project supported by the Shanghai Rising-Star Program (Grant No. 07QA14026), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10804072, 50703029 and 10774097), the STCSM (Grant Nos. 08JC1410400, 0752nm012, 0852nm02400, 0952nm02700, 061612042, 071605123), and the Chenguang Program (Grant No. 2008CG60).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: yslu@shiep.edu.cn