

# 用于硅太阳能电池的高效减反射膜

齐钰 孙平 冯纪蒙 张德霞

**摘要:**文中论述了硅电池上各类减反射膜的特性。分析了 $\lambda_0/4$ 和非 $\lambda_0/4$ 膜厚的双层减反射膜;介绍了 $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 和 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 双层减反射膜的设计、工艺和实验结果的有关数据。结果表明,该膜层牢固、性能稳定,可使硅太阳能电池获得较高的光电转换效率。

## 一、引言

硅太阳能电池依其用途不同而有不同的要求。作为光能转换的硅太阳能电池,要求它有较宽的光谱响应范围和较高的光电转换效率。硅太阳能电池的光电转换效率一般受电池本身多方因素的影响,如电池表面形成 $p\text{-}n$ 结的深浅程度、电极制备质量的好坏、光照表面减反射膜的减反射效果等等。本文就硅太阳能电池表面减反射膜的设计和制备予以描述。

## 二、减反射膜的设计

减反射膜的作用在于减少电池表面对光照的反射。根据光的干涉原理,光在界面的反射率 $R$ 几乎正比于基底材料的折射率 $n$ 。由于硅片的折射率较高( $n=3.5$ ),在空气中的界面反射率高达35%,因此对于结构定型的硅太阳能电池来说,如何有效地减少电池表面对阳光的反射,是提高电池光电转换效率的重要关键。

用于硅基底上的减反射膜可分为单层、双层和多层三种,可根据具体使用要求,按减反射膜的减反射条件匹配选择。就一般情况而言,双层减反射膜已基本上可以满足红外基底减反射的要求,其减反射指标一般有百分之几的剩余反射损失是允许的。因此,对于硅太阳能电池来说,应在剩余反射率3%左右前提下追求减反带宽。

根据薄膜理论<sup>[1]</sup>,对于一个每层光学膜厚为 $\frac{\lambda}{4}$ 的 $N$ 层减反射膜,当满足

$$\begin{cases} n_0 > n_N > n_{N-1} > \dots > n_1 > n_0 \\ \frac{n_1}{n_0} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_3}{n_2} = \dots = \frac{n_N}{n_{N-1}} = \frac{n_0}{n_N} \end{cases} \quad (1)$$

时,则在波长上有 $N$ 个零反射点,这些波长为:

$$\frac{(N+1) \cdot \lambda_0}{N \cdot 2}, \frac{(N+1) \cdot \lambda_0}{(N-1) \cdot 2}, \frac{(N+1) \cdot \lambda_0}{(N-2) \cdot 2}, \frac{(N+1) \cdot \lambda_0}{(N-3) \cdot 2}, \dots, (N+1) \cdot \frac{\lambda_0}{2}$$

由(1)式导出:

$$\begin{cases} n_0^{N+1} = n_0^N n_g \\ n_1^{N+1} = n_0^{N-1} n_g^2 \\ \vdots \\ n_N^{N+1} = n_0 n_g^N \end{cases} \quad (2)$$

(2) 式即为多层减反膜的消反射条件, 可在  $N$  个上述特定波长处获得零反射。

可见, 层数多零反射点就多, 低反射带则宽。

实用的硅太阳电池为防止宇宙空间高能辐射破坏电池性能, 在结构上要在镀减反膜的电极面粘结一薄平板玻璃予以保护。通常是用107或GN521胶胶合, 玻璃为BF-2或含铈(Ce)的特殊玻璃, 其结构如图1所示。这样就破坏硅电池上减反膜入射介质  $n_0 = 1$  的消反射条件, 必须将胶层、盖板玻璃考虑在内, 从整体上重新进行膜系设计。

图2、图3和图4是给定  $n_0 = 1.43$ ,  $n_g = 3.5$ , 由消反条件(2)式求得的单层、双层和三层减反射膜设计曲线。

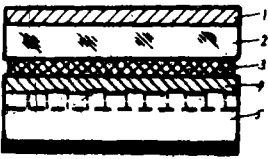


图1 实用的硅太阳电池结构剖面  
1—减反膜, 2—盖片玻璃  
3—胶层, 4—减反膜, 5—硅电池

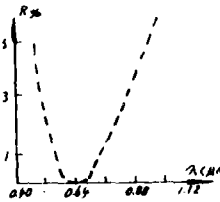


图2 计算的硅基底上单层减反膜光谱反射( $n_0 = 1.43$ )  
 $n = 2.24$   $n_g = 3.5$

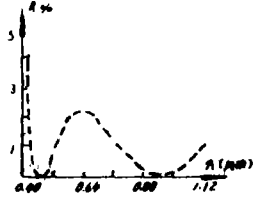


图3 计算的硅基底上双层减反膜光谱反射( $n_0 = 1.43$ )  
 $n_1 = 1.93$   $n_2 = 2.60$   
 $n_g = 3.5$

为减小使用波段内的最大反射, 根据减反膜的减反限定条件<sup>[2]</sup>, 对双层膜按  $R_{max} = 0.5\%$  限定, 有等效折射率  $T = \frac{n_1^2}{n_2} n_g = 1.152 n_0$ , 故  $n_2 = 0.932 n_1 \sqrt{n_g/n_0}$ , 可有G-2.6—1.78—1.43膜系。

图5和图6是经改进的双层和三层均可取得带宽内小于0.5%反射的减反膜设计, 遗憾的是折射率难以匹配。

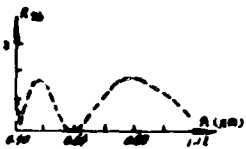


图4 计算的硅基底上三层减反膜光谱反射( $n_0 = 1.43$ )  
 $n_1 = 1.82$   $n_2 = 2.26$   
 $n_3 = 2.8$   $n_g = 3.5$

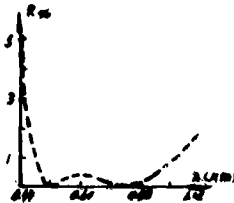


图5 经改进的硅基底上双层减反膜之光谱反射( $n_0 = 1.43$ )  $n_1 = 1.78$   
 $n_2 = 2.60$   $n_g = 3.5$



图6 经改进的硅基底上三层减反膜之光谱反射( $n_0 = 1.43$ )  $n_1 = 1.46$   
 $n_2 = 1.97$   $n_3 = 2.85$   
 $n_g = 3.5$

比较入射介质为胶层( $n_0 = 1.43$ )情况下的上述曲线可知, 双层和三层减反膜的减反效果远远好于单层, 主要特征是最大反射率下降, 波段内 $R$ 变小, 三层减反膜的平均反射由原来的1.7%下降到1%; 双层减反膜的平均反射情况同三层相当, 只是最大反射率略高于三层。

然而, 考虑到硅太阳能电池对光谱响应范围较宽的特殊要求和批量生产制备技术、制造成本的权衡, 目前实用的硅电池其减反膜国外采用单层和双层, 而国内则是单层。

化学反应淀积和真空涂镀是硅电池上获得减反膜的两种不同方法。文献<sup>[9]</sup>曾报导, 在金属钽的化合物中, 用化学反应在硅电池上形成 $Ta_2O_5$ 减反膜的方法, 其电池的电流增益可达41%, 经填加 $Al_2O_3$ 薄层后电流增益可达48%, 国内硅电池的减反膜制备通常是采用真空镀膜的方法获得 $Ta_2O_5$ 或者 $TiO_2$ 单层膜, 其电流增益可达39%左右。

对于如图1所示结构的硅太阳能电池选择如下减反膜膜系匹配:

减反膜1——单层 $MgF_2$ 膜

减反膜2—— $TiO_2-SiO_2$ 双层减反膜

结构中盖片玻璃 $n = 1.5$ , 胶层折射率 $n = 1.43$ 。

选取 $TiO_2-SiO_2$ 双层减反膜, 对于 $n_0 = 1.43$ 入射介质尚不满足消反射条件, 主要是从现有材料和制备工艺条件出发, 立足于涂镀氧化物薄膜以保证电池总体性能。

### 三、制备工艺要点和实验结果

双层减反射膜在DMDE450镀膜机上采用反射光极值法监控制备。内层选取二氧化钛和氧化钽混合料, 折射率接近2.3; 外层选取二氧化硅, 折射率为1.46。二氧化钛和五氧化二钽混合料经热压成型, 在 $2 \times 10^{-4}$ Torr氧压下慢速蒸发, 基底温度为 $300^\circ C$ , 以取得低吸收的牢固膜层。外层 $SiO_2$ 膜按常规工艺制备。

图7是实做的双层减反膜光谱反射曲线, 虚线为用二氧六环胶上玻璃盖片后的反射。图8是用以比较的非规整膜厚的双层减反膜设计光谱曲线。

对硅太阳能电池性能的评价, 是以其电池伏安特性表征。即测量其开路电压 $V_{oc}$ , 短路电流 $I_{sc}$ , 最大输出功率 $P_M$ 和光电转换效率 $\eta$ , 且有 $\eta = P_M / \text{入射功率}$ 。

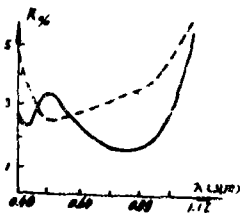


图7 实做的硅电池上 $TiO_2-SiO_2$ 双层减反膜之测量光谱反射 实线—无盖片 虚线—盖片玻璃胶合后的反射  $n_1 = 1.46$   $n_2 = 2.3$

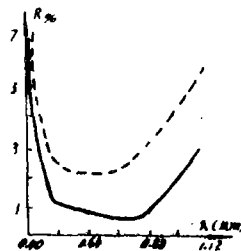


图8 硅电池上 $TiO_2-Al_2O_3$ 非规整膜厚双层膜之计算光谱反射 虚线—胶合盖片玻璃的反射曲线  $n_1 = 1.63$   
 $n_1 d_1 = 1556$   $n_2 = 2.23$   $n_2 d_2 = 1645$

由于电池的最大输出功率 $P_M$ 正比于短路电流 $I_{sc}$ ，故在相同光照条件下，对不同电池测量其短路电流 $I_{sc}$ 的大小，即可知光电转换效率的大小。

实测的硅太阳能电池尺寸为 $20 \times 20$ mm电池表面施加减反膜后用二氧六环溶液代替胶将 $0.4$ mm厚的玻璃盖片胶上，用太阳模拟器作为光源测量其电池的短路电流。实测结果列入表1。

表 1. 不同减反膜硅电池的测量数据

	无玻璃盖片			加玻璃盖片		电池尺寸 (mm <sup>2</sup> )
	$I_0$	$I'$	$\eta_1$	$I''$	$\eta_2$	
无减反膜电池	101.6			116.9	15.1%	$20 \times 20$ (此项 $I'' = I_0'$ )
TiO <sub>2</sub> 减反膜电池	102.8	142.7	38.9	145.6	11.6	$20 \times 20^*$
TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> 减反膜电池	105.5	163	54.5%	159	37.7%	$20 \times 20$
" "	217.3	315	45%	314	41.6%	$20 \times 40$
" "	105.5	162.3	53.8%	164.3	55.5%	(方案3) $20 \times 20$

(标准电池  $I_0 = 152.4$ mA)

表中:

$I_0$ : 电池无膜时在AM0条件下测得的短路电流值;

$I'$ : 镀减反膜后不加盖片在相同条件下测得的短路电流值;

$I''$ : 镀减反膜并加盖片在相同条件下测得的短路电流值;

$\eta_1$ : 电流增益比值;

\*: 不同测量值;

方案3: 盖片内表面镀减反膜。

## 四、结论和讨论

根据硅太阳能电池的结构，采用双层减反膜是必要的。硅电池上TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>和TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>双层减反膜，膜层牢固，性能稳定，对使用光谱区具有宽波段的低吸收和低反射特性，可使电池取得较大的短路电流增益和光电转换效率，因此是目前硅电池的一种高效减反射膜。

但是双层减反膜毕竟受其固有减反射带宽的限制，致使光电转换效率受到影响。为了更有效地提高硅太阳能电池的减反效果和光电转换效率，进一步研究三层宽带减反膜乃至多层非均匀减反射膜的实施，将具有更加广阔的前景。随着蒸发速率自动控制和气相混合蒸发技术的发展，非均匀减反膜的制备已为期不远。

计算中对硅基底未做复折射率和色散处理。

电子工业部第十八所王立才同志在测试工作中给予大力协助并提供有关数据，在此致谢。

参 考 文 献

- [1] 周九林、尹树百译, H·A·麦克劳德著, 光学薄膜技术, 国防工业出版社, 1974, 87—91
- [2] J.T.Cox, G.Hass and A.Thelen, J.Opt.Soc.Amer., 1962, 52, 956—967
- [3] H.Nakano, H.Morits and H.Washide, Optical Coatings for Energy Efficiency and Solar Applicatins, 1982, 324 191—197

## Anti-reflection Coating of Higher Efficiency on Si Solaode

Qi Yu Sun Ping Feng Jimeng Zhang Dexia

### Abstract

This paper describes the characters of various types of anti-reflection coatings on Si cells, analyzes two-layer anti-reflection coatings for both  $\frac{\lambda_0}{4}$  and anti  $\frac{\lambda_0}{4}$  thickness, introduces some results about design, technology and experiment for  $TiO_2-SiO_2$  and  $TiO_2-Al_2O_3$  two-layer anti-reflection coatings.

The results show that this type of coating is solid and stable and it makes Si solaode obtain higher optoelectronic transformation efficiency.