

· 光电器件与材料 ·

非晶硅太阳电池减反射膜的设计

高 华¹, 岳洋洋², 杨文华², 解光军²

(1. 上海超日太阳能科技股份有限公司, 上海 201406; 2. 合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 基于非晶硅太阳电池的工作原理, 对其减反射膜进行研究. 根据四分之一波长作用原理得到反射率最小时的厚度优化参数. 单层减反射膜选用 ITO ($n = 2.0, d = 75 \text{ nm}$), 加权平均反射率为 5.91%. 双层膜选用 MgF_2/ITO , 厚度分别为 111 nm 和 75 nm, 加权平均反射率为 3.72%. 此外, 还作出反射率随波长的变化曲线, 并通过计算仿真结果进行比较说明如何选材: 对于单层减反射膜, 采用折射率小的材料能取得更好的效果, 而对于双层减反射膜, 采用折射率上低下高形式, 能取得更好的效果.

关键词: 非晶硅; 减反射膜; 反射率

中图分类号: TM914.4⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)01-0041-04

Design of Anti-Reflection Coating for A-Si Solar Cell

GAO Hua¹, YUE Yang-yang², YANG Wen-hua², XIE Guang-jun²

(1. Shanghai Chaori Solar Energy Science & Technology Co. Ltd., Shanghai 201406, China;

2. School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The anti-reflection coating is researched theoretically based on the principle of the amorphous silicon solar cell. Following the quarter-wavelength action principle, the optimized thickness parameters can be obtained by computing the minimal reflectivity of the anti-reflection coatings. The single-layer anti-reflection coating adopts ITO ($n = 2.0, d = 75 \text{ nm}$) with the weighted average reflectance of 5.91%; the double-layer anti-reflection coating uses MgF_2/ITO with the thickness of 111 nm and 75 nm, and the weighted average reflectance of 3.72%. In addition, the variation curve of reflectivity with the wavelength is put forward to explain how to select materials according to the results calculated by the computer program: as for single-layer anti-reflection coatings, the materials with a small refractive index can achieve good results, and for the double-layer anti-reflection coatings, the materials with the low(up)/high(down) form of refractive index can get better effect.

Key words: amorphous silicon; anti-reflection coating; reflectivity

相对于晶体硅太阳电池而言, 非晶硅太阳电池具有对可见光的吸收强、价格低廉、高温性能好以及能量回收周期短等优点. 它是利用半导体材料的电子特性把光能直接转换成电能的光电器件, 其光电转换效率定义为总输出功率与入射到太阳电池表面的太阳光总功率的比值, 主要取决于 2 个方面, 首先

是太阳电池对入射光的吸收率, 对于裸硅太阳电池, 当光入射到电池表面时约有三分之一的光被反射, 从而使得电池对入射光的吸收减少; 其次是半导体材料本身的性质对于效率的影响. 文中研究如何减少电池表面对光的反射, 以提高太阳电池开路电压, 短路电流, 填充因子等各方面的电性能^[1,2].

收稿日期: 2010-01-12

基金项目: 安徽省自然科学基金(090412038)

作者简介: 高华(1982-), 男, 四川资阳人, 工程师, 研究方向为硅太阳电池技术; 解光军(1970-), 男, 安徽合肥人, 博士, 教授, 研究方向为集成电路设计.

对于非晶硅太阳能电池表面的透明导电膜既作为电池的上电极收集载流子,又可以当作减反射膜以降低太阳光在电池表面的反射,而透明导电膜材料的选择以及厚度的大小直接影响着光在电池表面的反射,因此有必要对透明导电膜进行优化设计,以得到最小的反射率.此外,还将研究在透明导电膜上再制备单层或双层减反射膜对入射光反射率的影响.对于不同材料、不同膜层数的减反射系统,设计其最佳厚度.文中将在深入研究非晶硅太阳能电池原理的基础上,通过计算机仿真得到电池反射率最低时膜系的各个最佳参数.

1 原理

1.1 减反射膜的四分之一波长原理

如图 1 所示,从第二个界面返回到第一个界面的反射光与从第一个界面的反射光相位差 180° ,所以前者在一定程度上抵消了后者^[1,3].

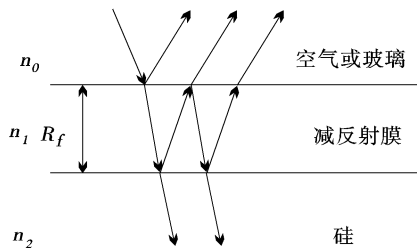


图 1 由四分之一波长减反射膜产生的干涉效应

在正常入射光束中从覆盖了一层厚度为 d_1 的透明层材料表面反射能量所占比例即反射率 R 为

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2\cos 2\theta}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2\cos 2\theta} \quad (1)$$

其中,不同层的折射率 r_1 、 r_2 和反射角度 θ 可由下式得出

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad \theta = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \quad (2)$$

当 $n_1 d_1 = \lambda_0/4$ 时,反射有最小值为

$$R_{\min} = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2} \right)^2 \quad (3)$$

可见如果减反射膜的折射率是两边材料折射率的几何平均值,则反射值为零.一些常用减反射膜材料的折射率如表 1 所示^[4,5].

1.2 电池的加权平均反射率

太阳光分布在一个较大的波长范围内,对太阳

表 1 制作单层或多层减反射膜所用材料的折射系数

材料	折射系数
MgF ₂	1.3~1.4
SiO ₂	1.4~1.5
Al ₂ O ₃	1.8~1.9
SiO	1.8~1.9
Si ₃ N ₄	1.9
TiO ₂	2.3
Ta ₂ O ₅	2.1~2.3
ZnS	2.3~2.4

电池要求在一个较宽的光谱范围内有良好的减反射效果.由硅材料的内部量子效率可知,此光谱范围为 350~1 120 nm.

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为

$$R_w = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) Q(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) Q(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

式中, $F(\lambda)$ 为入射光子通量,公式为

$$F(\lambda) = VP \quad (5)$$

式中, V 为该波长光的相对视敏度; P 为其辐射功率. $Q(\lambda)$ 为硅的内部量子效率,由图 2 得到; $R(\lambda)$ 为减反射膜在对应波长点的反射率,由式(1)、式(2)得到; λ_1 、 λ_2 为光谱波长上下限, $\lambda_1 = 350$ nm、 $\lambda_2 = 1 120$ nm. 加权平均透射率为 $T_w = 1 - R_w$.

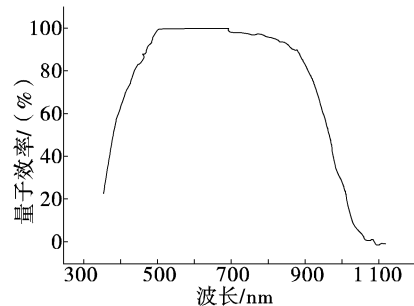


图 2 硅材料的内部量子效率

加权平均反射率可给出整个波长范围内平均反射率的具体值,由加权平均反射率值可以很准确地判断出膜系在硅的光谱响应范围内总的减反射效果.

2 减反射膜设计分析

在以下的讨论中取中心波长为 600 nm,变化曲线的波长单位为 nm^[6].

2.1 单层透明导电膜

在单层透明导电膜的情况下,一般选择 ITO ($n=2.0$)和 SnO_2 ($n=2.09$)作为透明导电电极,根据四分之一波长原理,其厚度分别为 75 nm 和 72 nm^[7].

图 3 为 ITO($n=2.0$)和 SnO_2 ($n=2.09$)单层膜的反射率随波长的变化曲线,由图 3 可知,它们都能在 600 nm 左右的地方取得最小值.经过计算,ITO($n=2.0$)的加权平均反射率为 5.91%,而 SnO_2 的加权平均反射率为 6.41%.由此可见,在整个光谱响应波长范围内,ITO($n=2.0$)有更好的减反射效果.

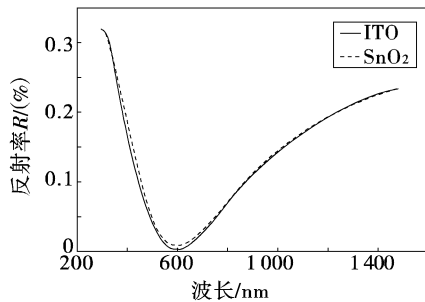


图 3 单层透明导电膜反射率 R 随波长 λ 的变化曲线

2.2 透明导电膜 + 单层减反射膜

一般情况下减反射膜材料为 MgF_2 ($n=1.35$)、 SiO_2 ($n=1.46$)、 Al_2O_3 ($n=1.9$)、 TiO_2 ($n=2.3$),透明导电膜的材料为 ITO ($n=2.0$)和 SnO_2 ($n=2.09$)^[8].

为了说明问题,首先选择 2 种组合,即 MgF_2/ITO ($d=111$ nm、75 nm), TiO_2/ITO ($d=65$ nm、75 nm),它们的反射率随波长的变化曲线如图 4.从图 4 中可以看出,在光谱响应范围内,透明导电膜与低折射率减反射膜的组合比低折射率透明导电膜加高

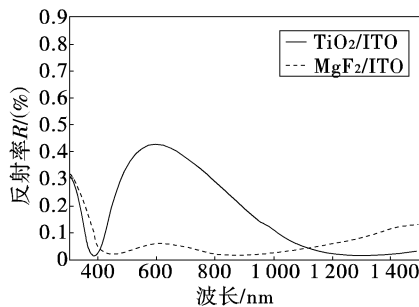


图 4 透明导电膜 + 单层减反射膜反射率 R 随波长 λ 的变化曲线

折射率减反射膜的效果好.上面两种组合的加权平均反射率分别为 3.72% 和 30.53%,由此可见, MgF_2/ITO 明显优于 TiO_2/ITO .

比较图 3 与图 4 可知,在两层膜的情况下,在很大的波长范围内都有较小的反射率,而单层膜只在单个波长点附近有较小的反射率.

再看另外两种情况, SiO_2/ITO ($d=103$ nm、75 nm)和 MgF_2/ITO ($d=111$ nm、75 nm),反射率随波长的变化曲线如图 5 所示,在 300~450 nm 和 900~1500 nm 范围内, SiO_2/ITO 优于 MgF_2/ITO ;而在 450~900 nm 范围内, MgF_2/ITO 明显优于 SiO_2/ITO .经过计算, SiO_2/ITO 的加权平均反射率为 5.57%,而 MgF_2/ITO 的加权平均反射率为 3.72%,可见在相同情况下减反射膜材料的折射率低一些效果会更好.

综上所述得到如下结论,即设计两层膜的时候,选择材料应遵循两层膜的位置关系最好是上面一层的折射率低一些而下面一层的高一些的原则.

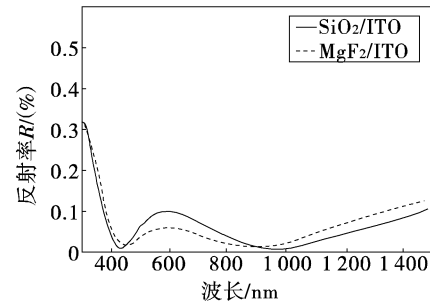


图 5 透明导电膜 + 单层透明导电膜反射率 R 随波长 λ 的变化曲线

2.3 透明导电膜 + 双层减反射膜

在此设计了两种三层膜系, $\text{MgF}_2/\text{SiO}_2/\text{ITO}$ 和 $\text{SiO}_2/\text{MgF}_2/\text{ITO}$,透明导电膜始终不变,只是交换两种减反射膜的位置, MgF_2 、 SiO_2 、ITO 的厚度分别为

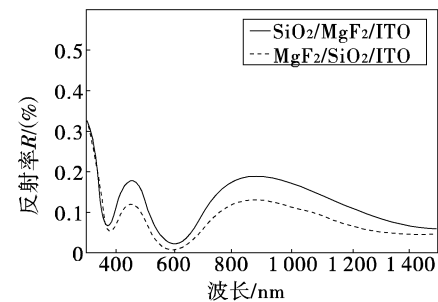


图 6 双层减反射膜 + 透明导电膜反射率 R 随波长变化曲线

111、103.75 nm. 运行后的图形如图 6, 计算其加权平均反射率分别为 7.26% 和 11.63%, 可见 $\text{MgF}_2/\text{SiO}_2/\text{ITO}$ 的组合要优于 $\text{SiO}_2/\text{MgF}_2/\text{ITO}$.

可得如下结论, 如果要设计单层透明导电膜加两层减反射膜的结构, 两种减反射膜的位置关系最好是上面一层的折射率低一些而下面一层的高一些, 这样能取得更好的减反射效果.

3 结 束 语

就如何设计非晶硅太阳能电池减反射膜的最优参数问题进行计算机仿真, 并讨论了几种应用广泛的减反射膜材料的优化设计. 在整个非晶硅的光谱响应范围内, 对于单层透明导电膜, 折射率小的材料如 ITO 的反射效果更好, 对于两层膜的情况, 在可见光谱范围内, 在透明导电膜上加上一层比其折射率低的减反射膜, 这样的组合会比低折射率的透明导电膜上加上一层高折射率的减反射膜的效果好, 并且在

(上接第 21 页)

今后光伏系统在国内的推广使用. 因此作为光伏产业中的一员, 需要加强对实际应用系统的经验积累, 综合考量用户的成本和系统的稳定.

随着产业技术的革新, 新材料、太阳能电池的转化效率、蓄电池的性价、中间控制转换环节的改善, 成本必然会大大降低. 相信太阳能照明系统在很多场合完全可以取代传统照明系统, 逐渐走进寻常百姓家. 同时也会在很大程度上改善能源结构和减轻环保压力, 增强我国的能源安全.

参考文献

[1] S R Wenham. 应用光伏学[M]. 狄大卫. 上海: 上海交

(上接第 40 页)

- [5] M Campbell, D N Sharp, et al. Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography [J]. Nature, 2000, 404(6773): 53 - 56.
- [6] Satoru Shoji, Satoshi Kawata. Photofabrication of three-dimensional photonic crystals by multibeam laser interference into a photo-polymerizable resin [J]. Applied Phys. Let., 2000, 76(19): 2668 - 2670.
- [7] Toshiaki Kondo, Shigeki Matsuo, Saulius Juodkazis, et al. Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals [J]. Applied Phys. Let., 2001, 79:

一定范围内, 膜层越多效果越好.

参考文献

- [1] 马丁·格林. 太阳能电池工作原理、工艺和系统的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.
- [2] <http://club.elanw.com/dispbbs.asp?boardID=56&ID=4041>.
- [3] 林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [4] 唐晋发, 顾培夫. 薄膜光学与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [5] 张亚萍, 殷海荣, 李启甲, 等. 透明导电薄膜的研究进展[J]. 光机电信息, 2006, 49(2): 56 - 67.
- [6] 徐颖, 高劲松, 王彤彤, 等. ITO 材料在减反射膜设计中的应用[J]. 光子学报, 2005, 34(8): 1187 - 1189.
- [7] 杨文华, 吴鼎祥, 李红波. 空间高效硅太阳能电池减反射膜设计与数值分析[J]. 半导体学报, 2004, 25(9): 1118 - 1122.
- [8] 杨文华, 李红波, 吴鼎祥. 太阳能电池减反射膜设计与分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, 10(1): 39 - 42.
- [9] 通大学出版社, 2008: 78 - 85, 205 - 211.
- [2] 太阳光发电协会[日]. 太阳能光伏发电系统的设计与施工[M]. 刘树民, 宏伟. 北京: 科学出版社, 2004: 1 - 8, 62 - 70, 78 - 79.
- [3] 鞠振河. 太阳能路灯系统的优化设计[J]. 可再生能源, 2007(5): 79 - 84.
- [4] 孙利英, 闫文红. 智能型太阳能灯具控制系统[J]. 阳光能源, 2009(1): 12 - 13.
- [5] 侯现伟, 房建国. 控制器在太阳能路灯中的应用[J]. 阳光能源, 2009(1): 26 - 27.
- [6] RETScreenInternational, www.etscreen.net.
- [8] Shu Yang, Mischa Megens, Joanna Aizenberg, et al. Creating Periodic Three-Dimensional Structures by Multibeam Interference of Visible Laser [J]. Chem. Mater., 2002, 14(7): 2831 - 2833.
- [9] Wandg Hui, LI Yongping. An Eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals[J]. Acta physica sinica, 2001, 50(11): 2172 - 2178 (in Chinese).
- [10] He Xiu-jun, XIE Kang, XIANG An-ping, et al. Research of band gap of 1D photonic crystals [J]. Laser technology, 2008, 32(5): 508 - 509, 512 (in Chinese).