

基于光学微结构减小硅太阳能电池的反射

廖同庆¹, 彭露露¹, 吴 昇², 刘 波¹, 肖广东¹

- (1. 安徽大学 电子信息工程学院, 安徽 合肥 230039;
2. 合肥师范学院 计算机学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 为了在理想的光频范围内扩展硅太阳能电池的低反射特性, 设计了一种由方柱形粒子周期排列构成的光学微结构, 根据等效介质理论分析了方柱形粒子高度、占空比对反射率的影响。利用所得结论合理选择方柱形粒子的尺寸, 使用 MEEP 仿真软件建立了结构模型并进行了仿真。结果表明: 该光学微结构在理想的光频范围内具有超低反射特性。

关键词: 晶体硅太阳能电池; 等效介质理论; 光学微结构; 超低反射

中图分类号: TN20 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0201-04

Reduce reflected light from silicon solar cells based on optical microstructure

Liao Tongqing¹, Peng Lulu¹, Wu Sheng², Liu Bo¹, Xiao Guangdong¹

- (1. School of Electronics and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230039, China;
2. School of Computer Science and Technology, Hefei Normal University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to expand the low reflective properties of silicon solar cells in a perfect frequency range, a kind of optical microstructures composed of period arranged square pillar was designed. On the base of the effective medium theory, the reflectivity of silicon solar cells changing with the pillar's altitude and duty cycle was studied. Then, a structural model was set by simulation software "MEEP". The results of the simulated research demonstrate that the optical microstructures can very effectively reduce the reflection in a perfect optical frequency range.

Key words: crystalline silicon photovoltaic cells; effective medium theory; optical microstructure; ultra-low reflection

收稿日期: 2014-05-05; 修订日期: 2014-06-09

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20123401120008); 安徽高校省级科学研究重点项目(KJ2012A241)

作者简介: 廖同庆(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事现代光通信方面的研究。Email: t.liao@ahu.edu.cn

0 引言

太阳能是一种干净、可再生的,取之不尽、用之不竭的新能源,而且太阳能发电绝对干净,不产生公害^[1-2]。其利用方式有三种:(1)光电转换,如太阳能电池;(2)光热转换,如太阳能热水器、太阳能温室等;(3)光化转换,如植物的光合作用将光能转换成化学能^[3]。然而,光电转换是人类利用太阳能最有效的途径,太阳能电池作为对太阳能利用的一种装置已经深入到人类生活的方方面面。提高太阳能电池转换效率、降低成本是目前光伏行业的研究重点。太阳能电池的转化效率受到电池本身和太阳光两大因素的影响。在太阳能电池系列中,硅基太阳能电池的转化效率最高,技术也最为成熟。Kyocera 公司制备的大面积 (225 cm²) 单晶硅太阳能电池转换效率为 19.44%,国内北京太阳能研究所也积极进行高效晶体硅太阳能电池的研发,研制的平面高效单晶硅电池(2 cm×2 cm)转换效率达到 19.79%,刻槽埋栅电极晶体硅电池(5 cm×5 cm)转换效率达 8.6%^[4]。2010年,Harry A. Atwater 等人通过金纳米粒子层的相互连接,大幅度地提高了光电太阳能电池的光电转化率。金纳米粒子通过等离子效应,可在薄薄的有机光电层中产生强电磁场,其结果是将光能聚集使其更多地被电池中的光吸收区捕获。但是,金属纳米结构融入光电太阳能电池结构中存在着不少困难,需要进一步研究并化解这些难题^[5]。

从另一角度来看,太阳能电池的效率由电学损失和光学损失决定。光学损失包括表面反射、遮挡损失和电池材料的光谱效应特性^[6]。文中立足于减小表面反射损失,以便提高硅基太阳能电池的转换效率。

1 等效介质理论

参考文献[7]利用圆柱形硅粒在硅基板上实现了超低反射,提高了太阳能电池的效率;参考文献[8]则分析了各种形状二维纳米结构表面的反射。文中在硅基板上设计了由方柱形硅粒周期排列所构成的二维光学微结构,实现超低反射,提高太阳能电池的效率。如图 1 所示: H 为方柱的高度, W 为方柱的长度, T 为方柱中心之间的间隔(方柱的周期),方柱的材料为硅,衬底为硅板。

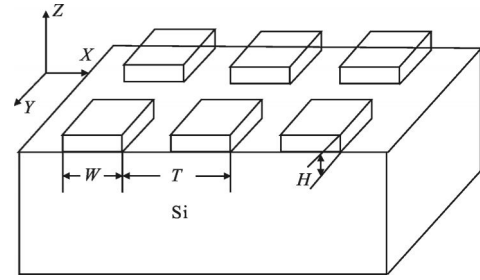


图 1 方柱形粒子构成的二维微结构图

Fig.1 2D microstructure consists of period arranged square pillar

当微结构的周期小于入射光波长(即 $T < \lambda/n$)时,二维微结构具有均匀介质的特性,可以借助等效介质理论进行分行,即将此结构看成一层均匀的介质薄膜,从而可以将复杂的二维结构转化成一维结构来分析。对于单层薄膜,其光学特性主要受到薄膜的厚度以及折射率的影响。

引入参数占空比 f ,则文中 X 、 Y 方向的占空比均为 $f=W/T$ 。根据等效介质理论,二维方柱形微结构的等效折射率 n_{eff} 可以表示为^[9-10]:

$$n_{\text{eff}} = \left| \frac{(1-F+F \cdot n^2)[(F+(1-F) \cdot n^2)+n^2]}{2[F+(1-F) \cdot n^2]} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: $F=f^2$ 称之为整个方柱的占空比(非正方形结构 $F=f_x \times f_y$); n 为材料的折射率。当入射角为零(即正入射)时,等效单层膜的反射率 R 可表示为:

$$R = \frac{(n_0 - n)^2 \cos^2 \delta + (n_0 n / n_{\text{eff}} - n_{\text{eff}}) \sin^2 \delta}{(n_0 + n)^2 \cos^2 \delta + (n_0 n / n_{\text{eff}} + n_{\text{eff}}) \sin^2 \delta} \quad (2)$$

式中: $n_0=1$ 为空气, $\delta=2\pi n_{\text{eff}} H/\lambda$ 为光波经过单层膜产生的相位差。因此,对于特定波长 λ ,等效介质膜的反射率只与等效折射率 n_{eff} 和高度 H 有关,而等效折射率 n_{eff} 与所选微粒的占空比和材料有关。

2 二维光学微结构基本参数的设置

根据上述分析可知,方柱形粒子的高度和占空比都会对其反射率产生影响,下面分别就方柱形粒子高度对反射率的影响、方柱形粒子占空比对反射率的影响进行分析。

2.1 方柱形粒子的高度对反射率的影响

由于微粒的高度 H 等效为膜的厚度,它决定光经过膜后的相位差 δ 。由薄膜理论可知,当膜的厚度满足 $H = \lambda / (4n_{\text{eff}}) (2k+1)$, $k=0, 1, 2, \dots$ 时,反射率取最小值。

$$R_{\min} = \left| \frac{(n_0 n / n_{\text{eff}} - n_{\text{eff}})^2}{(n_0 n / n_{\text{eff}} + n_{\text{eff}})^2} \right| \quad (3)$$

当膜的厚度满足 $H = \lambda / (4n_{\text{eff}})(2k+2), k=0, 1, 2, \dots$ 时,反射率取最大值。

$$R_{\max} = \left| \frac{(n_0 - n)^2}{(n_0 + n)^2} \right| \quad (4)$$

由于相位差 $\delta = 2\pi n_{\text{eff}} H / \lambda$ 与中心波长 λ 和粒子的高度 H 有关,在整个光频内,若 H 越大,则相位差 δ 的变化越大,反射率 R 在整个光谱范围内的波动频率也越大。利用 Matlab 编程绘制了 300~1 200 nm 波长范围内,中心波长 $\lambda = 550$ nm 时,在不同粒子的高度下反射率 R 随波长变化的曲线,如图 2 所示。

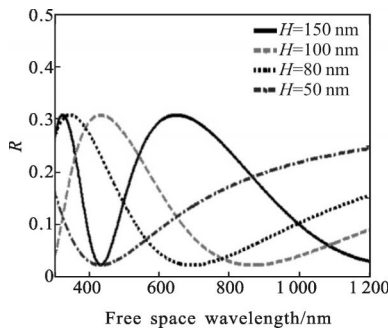


图 2 不同高度下反射率 R 随波长变化曲线图

Fig.2 Change curves of reflectivity R under different height

从图 2 中可以得到如下结论:方柱的高度 H 越大,反射率 R 的变化频率就越大;当方柱粒子的高度一定时,入射波波长越小,反射率 R 的变化频率就越高,反之, R 的变化频率就越低。

2.2 方柱形粒子的占空比对反射率的影响

由等效介质理论可知,等效折射率是一个关于占空比的函数。公式(3)表明反射率最小值的大小由等效折射率决定,当等效折射率 $n_{\text{eff}} = \sqrt{n_0 n}$ 时,反射率 R 为零。文中 n_0 为空气折射率, $n_0 = 1, n$ 为硅基板折射率, $n = 3.5$, 可求解 $n_{\text{eff}} = 1.87$ 。将等效折射率的计算值代入公式(1)可得占空比 $f = 0.62$ 。因此,合理选择方柱形粒子的宽度和周期,可以在硅基板表面获得超低的反射率,从而达到提高太阳能利用效率的目的。

中心波长 $\lambda = 550$ nm,方柱高度为 1/4 中心波长,为了计算方便,文中选取周期 $T = 100$ nm,研究不同的占空比 f 对反射率 R 的影响。利用 Matlab 编程绘制不同占空比下的反射率 R 随自由空间波长变化的曲线,如图 3 所示。

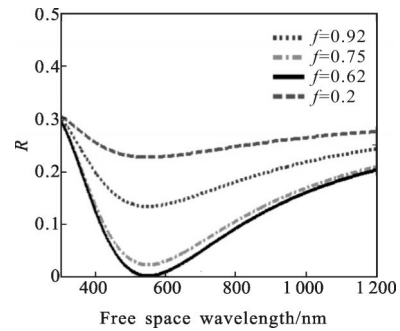


图 3 不同占空比下的反射率 R 随自由空间波长变化的曲线

Fig.3 Change curves of reflectivity R along with free space wavelength change under different duty ratios

从图 3 中可以得到如下结论:当 $f = 0.62$ 时,反射率 R 能取到最小值,此时最小值 $R = 0$;当 $f \neq 0.62$ 时,反射率 R 也能取到最小值,但是最小值 $R > 0$,与理论分析的结果一致;当 f 越接近 0.62 时,整个光频范围内的反射率 R 也就越低,反之,反射率 R 就越高。

3 模型的建立与仿真

根据以上理论的分析,二维微结构的基本参数确定如下:方柱形粒子的高度 $H = 73.5$ nm,方柱形粒子的宽度 $W = 62$ nm,方柱形粒子的周期 $T = 100$ nm。利用 MEEP 软件在 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 的硅基板上建立了 100 个方柱形粒子的模型,如图 4 所示。

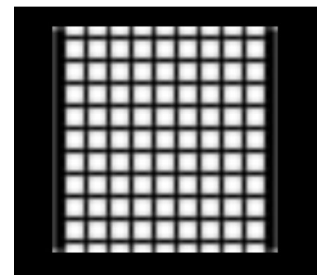


图 4 光学微结构模型的横截面

Fig.4 Cross section of optical microstructures model

MEEP 是一款由麻省理工学院开发的基于时域有限差分法的电磁系统仿真软件,其源代码完全开放,功能十分强大。在 MEEP 中利用已建成的模型,以高斯源作为仿真的激励源模拟电磁波垂直入射在二维光学微结构上,仿真结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,该微结构表面的反射率在 350~1200 nm 波长范围内都降到了 2% 以下,表明该微结构具有超低的反射率以及较宽的频谱特性,从

而大大降低了硅基板表面的反射损耗。

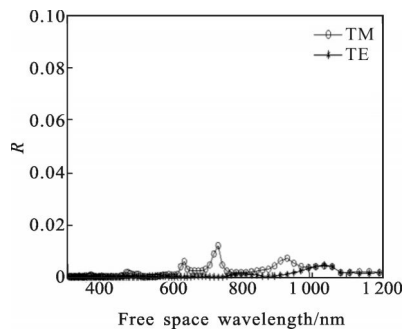


图 5 TE 与 TM 波照射下光学微结构的反射率曲线

Fig.5 Change curves of reflectivity R under TE and TM waves

4 结论

文中利用由方柱形粒子构成的二维光学微结构来减小硅基板的反射, 根据等效介质理论分析了方柱形粒子的大小对反射率的影响, 利用所得结论合理选择粒子的尺寸。运用 MEEP 软件建立结构模型进行仿真验证, 仿真结果表明文中所设计的二维光学微结构具有低反射特性, 完全满足设计要求。所设计的二维光学微结构由方柱形粒子周期排列构成, 便于在硅基板上直接刻写, 从而克服了传统的减反射膜易脱落、结构复杂等缺点。

研究表明, 光学微结构的周期必须小于入射光波长时才可以等效介质理论将复杂的二维结构转化为一维结构进行分析。当微粒半径的大小接近或大于入射光线的波长 λ 时, 需要借助米氏散射 (Mie scattering) 进行分析, 将另文研究。

参考文献:

- [1] Zhou Siqing, Ma Chaoqun, Li Lin. Research on sustainable development theory of solar energy photovoltaic industry[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2007, 24(7): 88-90. (in Chinese)
周四清, 马超群, 李林. 太阳能光伏产业可持续发展理论研究思考[J]. *科技进步与对策*, 2007, 24(7): 88-90.
- [2] Qiu Dongdong, Wang Rui, Cheng Xiangai. Damage effect of monocrystalline silicon solar solar cells under ultrashort pulse laser irradiations [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 1007. (in Chinese)
邱冬冬, 王睿, 程湘爱. 超短脉冲激光对单晶硅太阳能电池的损伤效应[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 1007.
- [3] Miles R W, Hynes K M, Forbes I. Photovoltaic Solar cells: An overview of state of art cell development and environmental issues [J]. *Prog Crystal Growth Charact Mater*, 2005, 51: 1-42.
- [4] Li Huaihui, Wang Xiaoping, Wang Lijun, et al. Progress of Silicon Solar Cell [J]. *Materials Review*, 2011, 25(19): 146. (in Chinese)
李怀辉, 王小平, 王丽军, 等. 硅半导体太阳能电池进展 [J]. *材料导报*, 2011, 25(19): 146.
- [5] Atwater H A, Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 205-213.
- [6] Wang Quanzhi, Jing Xili, Ma Yiheng, et al. Refractive indexes distribution of anti-reflection coatings for high efficiency silicon solar cells [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 41(6): 669-672. (in Chinese)
王全志, 井西利, 马懿恒, 等. 高效硅太阳能电池减反射膜系折射率分布 [J]. *激光与红外*, 2011, 41(6): 669-672.
- [7] Spinelli P, Verschuuren M A. Broadband omnidirectional antireflection coating based on subwavelength surface Mie resonators[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1-5.
- [8] Wang Xiang, Yu Yanqing, Chu Jiuru. Simulation and research on reflection properties of two-dimension micro/nano structure surface by FDTD method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(2): 159-164. (in Chinese)
王翔, 余彦清, 褚家如. 二维微纳结构表面反射特性的时域有限差分法模拟研究 [J]. *光子学报*, 2012, 2(41): 159-164.
- [9] Chang Y C, Mei G H, Chang T W, et al. Design and fabrication of a nano-structured surface combining antireflective and enhanced-hydrophobic effects [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(28): 285303-285308.
- [10] Diedenhofen Silke L, Janssen Olaf T A, Grzegorz Grzela, et al. Strong geometrical dependence of the absorption of light in arrays of semiconductor nano-wires[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(3): 2316-2323.