

光栅减反层太阳能电池光电转换效率的研究

钟 慧¹, 高永毅^{2*}, 周仁龙², 周并举², 唐立强², 吴伶俐², 李宏建³

1. 湖南科技大学机电工程学院, 湖南 湘潭 411201
2. 湖南科技大学物理学院, 湖南 湘潭 411201
3. 中南大学物理科学与技术学院, 湖南 长沙 410083

摘 要 运用时域有限差分方法, 研究了光栅减反层结构对太阳能电池光电转换效率及储能效果的影响。具体从光栅形状、高度以及光栅表面金属薄膜厚度出发。结果表明经光栅减反层优化表面结构的太阳能电池的光电转换效率显著增大, 储能效果大大得到提升。尤其是三角形光栅太阳能电池。随着镀层厚度的增加, 储能效果增加, 但当薄膜厚度过厚时, 储能效果反而降低。

关键词 太阳能电池; 光电转换效率; 时域有限差分方法

中图分类号: TM914.4 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)07-1739-04

引 言

太阳能电池是一种利用光生伏特效应将太阳光能直接转化为电能的器件^[1]。自1954年Chapin等人在美国贝尔实验室成功研制出第一块单晶硅太阳能电池^[2], 从而有了大量的工作都来研究这种结构模式的发电效应及其隐含的物理机制。此后, 基于材料以及成本等其他因素, 薄膜太阳能电池问世^[3]。麻省理工学院的研究人员借鉴电磁波在刻有光栅的金属表面会产生异常的反射光谱这一研究结果^[4], 在硅基层上刻着凹槽和凸起, 使表面形成光栅, 研究结果表明, 太阳能电池的转化效率提高了15%。一种新型太阳能电池首次突破了传统的吸光材料的光捕获极限, 随着对太阳能电池结构不断的研究, 太阳能电池将进一步得到改善^[5]。

本文运用时域有限差分方法(FDTD)^[6], 研究了光栅减反层结构对太阳能电池光电转换效率及储能效果的影响。文章分别从光栅形状、高度、光栅表面金属薄膜的厚度参数出发。研究了有光栅减反层和无光栅减反层的太阳能电池的光电转换效率和储能能力。这两种不同结构的太阳能电池光电转换效率和储能能力的差别很大。因为照射在太阳能电池硅板上的光被反射回时, 光栅接收到这些反射光并以更低的角度将这些反射光重新反射回硅基层内, 反射光并没有损失, 而是重新被反射回硅基层, 延长了光在电池硅基的停留时

间。电池也就能吸收更多的太阳能, 从而能将更多的太阳能转化成电能。即光栅具有减小表面反射的作用。还进一步分析太阳能电池吸收的光波长范围在700~1300nm之间, 即太阳能电池吸收的光波长范围主要是近红外光, 还有部分可见光。

1 计算结果和讨论

当电磁波与物质作用时, 在宏观上可以根据物质状态方程以及电磁波的麦克斯韦方程加以描述, 由麦克斯韦方程组有

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{H} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon(\omega)\mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H} \quad (4)$$

式中, $\varepsilon(\omega)$ 是介质的介电函数, μ_0 是真空磁导率, $\mathbf{D}$ 是电位移矢量, $\mathbf{E}$ 是电场矢量, $\mathbf{B}$ 是磁场强度矢量, $\mathbf{H}$ 是磁场矢量。

假设系统对电场的响应是线性的, 则电位移矢量 $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ 可以写成电场和介电响应函数 $\Phi(\mathbf{r}, t)$ 的卷积积分

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} dt' \Phi(\mathbf{r}, t-t') \mathbf{E}(\mathbf{r}, t') \quad (5)$$

介电响应函数 $\Phi(\mathbf{r}, t)$ 是介电函数 $\varepsilon(\mathbf{r}, \omega)$ 的傅里叶变换

收稿日期: 2010-10-15, 修订日期: 2011-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(10947172), 湖南省自然科学基金项目(10JJ6008, 10JJ9002, 10JJ6101, 07JJ6128)和湖南省教育厅基金项目(90C404)资助

作者简介: 钟 慧, 女, 1985年生, 湖南科技大学机电工程学院硕士研究生 e-mail: zhonghui 1217@163.com

* 通讯联系人 e-mail: gaoyongyi5188@163.com

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{E}(\mathbf{r}, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega \quad (6)$$

式(6)的实部与虚部可分别表示如下

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}[\mathcal{E}] &\equiv \epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma_d^2} \\ \operatorname{Im}[\mathcal{E}] &\equiv \epsilon_i = \frac{\omega_p^2 \gamma_d}{\omega(\omega^2 + \gamma_d^2)} \end{aligned} \quad (7)$$

在太阳能电池的光栅减反层表面镀了金属薄层, 本文采用的是 Drude 色散材料模型。Drude 色散材料模型是用于模拟金属类材料在虑及色散时的光学特性的模型。Drude 色散材料的介电系数表达式如下式所示

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(1 + i\omega_c)} \quad (8)$$

其中 ω_p 为金属的等离子频率, ω_c 为金属内部自由电子的碰

撞频率, ϵ_{∞} 为当 $\omega = \omega_p$ 时金属的介电系数。本文取 $\epsilon_{\infty} = 1$, $\omega_c = 1.45 \times 10^{13}$, $\omega_p = 1.9099 \times 10^{15}$ 。

图 1(a) 显示了光栅减反层太阳能电池的平面结构图。光栅下面是 Si 平板材料, 再下面是 SiO_2 衬底材料。镀层厚度 $t = 0$ 时, 则表示 Si 光栅表面未镀金属薄膜。图(b) 表示一个单元胞的计算区域的截面图, 光源是沿 y 方向入射到太阳能电池的光栅减反层上, 在计算区域的 y 方向上设置了完全匹配吸收边界, x 方向上设置了周期边界条件。 x 方向的晶格常数 $a = 560 \text{ nm}$, 光栅在 x 方向上的宽度 $b = 280 \text{ nm}$, y 方向上光栅高度 $h = 320 \text{ nm}$ 。

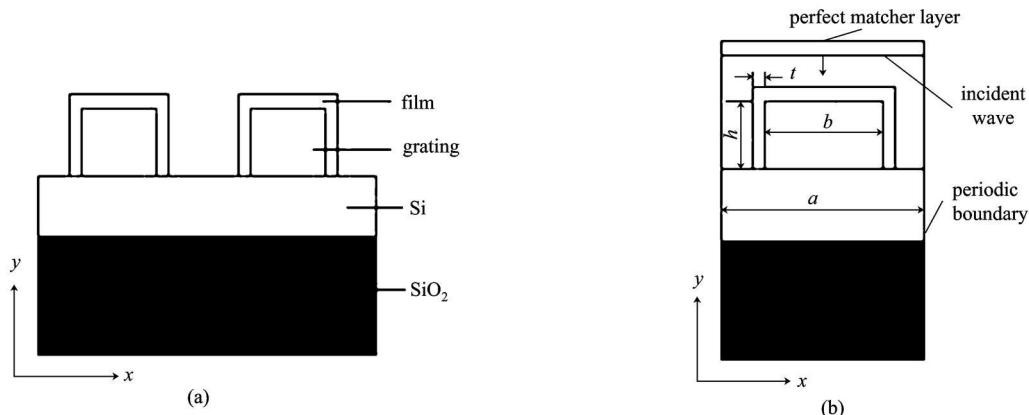


Fig 1 The structure in xy plane of the grating solar cells. (a) The grating is Si materials; the metal film is silver, (b) A cross section of the computational region

图 2(a) 表示不同形状的 Si 光栅减反层太阳能电池储能强度随波长的变化曲线。没有光栅结构时, 两个峰的波长分别是 780 和 980 nm; 采用三角形光栅时, 两个峰的波长分别是 850 和 1 050 nm; 梯形光栅时, 两个峰的波长分别是 900 和 1 150 nm; 矩形光栅时, 两个峰的波长分别是 920 和 1 220 nm。峰值中心位置明显发生红移。图 2(b) 和 (c) 分别表示当光栅表面镀层厚度为 20 和 60 nm 时, 太阳能电池储能强度随波长的变化关系。结果发现: 图 2(b) 中储能波峰向长波长的方向移动, 即发生红移。图 2(c) 中梯形光栅和矩形光栅太阳能电池的储能强度减弱。图 2(a) — (c) 都表明太阳能电池

储能的波长在 700~1 300 nm 范围, 主要是吸收近红外光, 还有部分可见光。

图 3(a) — (c) 表示, 当单色入射光时, 在三种不同的镀膜厚度下, 不同形状的 Si 光栅减反层太阳能电池储能强度随时间的变化关系图。和没有光栅结构相比, 具有光栅减反层太阳能电池储能效果显著提高, 三角形光栅减反层太阳能电池的储能强度最高。这是因为三角形光栅减反层相当于在太阳能电池表面形成了表面绒毛光子晶体周期性结构, 且增大了光线在表面的传播路径, 调节了光在光栅减反层的传输特性, 增大了光栅减反层对光的吸收。图 3(b) 表明: 当光栅

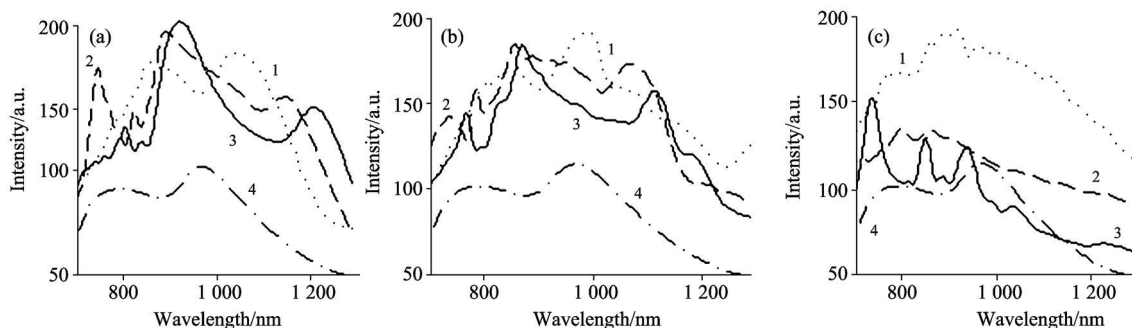


Fig 2 Si grating solar cells energy intensity change with wavelength for different shapes of grating

(a): The film thickness is 0 nm; (b): The film thickness is 20 nm; (c): The film thickness is 60 nm

1: Triangular; 2: Trapezoidal; 3: Rectangular; 4: No-grating

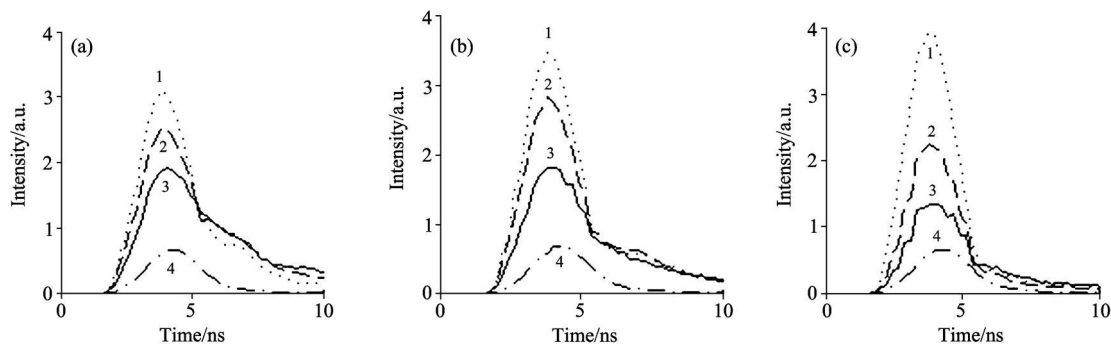


Fig 3 Si grating solar cells energy intensity change with time for different shapes of grating

(a): The film thickness is 0 nm; (b): The film thickness is 20 nm; (c): The film thickness is 60 nm

1: Triangular; 2: Trapezoidal; 3: Rectangular; 4: Non-raster

表面镀层厚度为 20 nm 时, 三角形光栅和梯形光栅太阳能电池的储能强度得到了提高。图 3(c) 表明: 当光栅表面镀层厚度为 60 nm 时, 只有三角形光栅太阳能电池的储能强度得到了提高。

三角形光栅高度对光栅减反层太阳能电池储能有影响。以 Si 材料三角形光栅减反层太阳能电池为例。分别取三角形光栅高度 $h = 200$ nm, $h = 320$ nm 以及 $h = 440$ nm 三组数据进行分析。图 4(a) 和(b) 分别表示三角形光栅减反层太阳

能电池储能强度随波长和随时间的变化曲线图。图 4(a) 表示随着光栅高度的增加, 太阳能电池的储能峰值中心位置发生红移, 同时峰值个数增多。图 4(b) 表示随着光栅高度的增加, 太阳能电池的储能效果反而降低。

金属镀层厚度对光栅减反层太阳能电池储能也有影响。以 Si 材料三角形光栅太阳能电池为例。三角形光栅高度 $h = 320$ nm, 金属镀层厚度分别取 $t = 0$ nm, $t = 20$ nm, $t = 40$ nm 以及 $t = 60$ nm 四组数据进行分析。图 5(a) 和(b) 分别为太阳

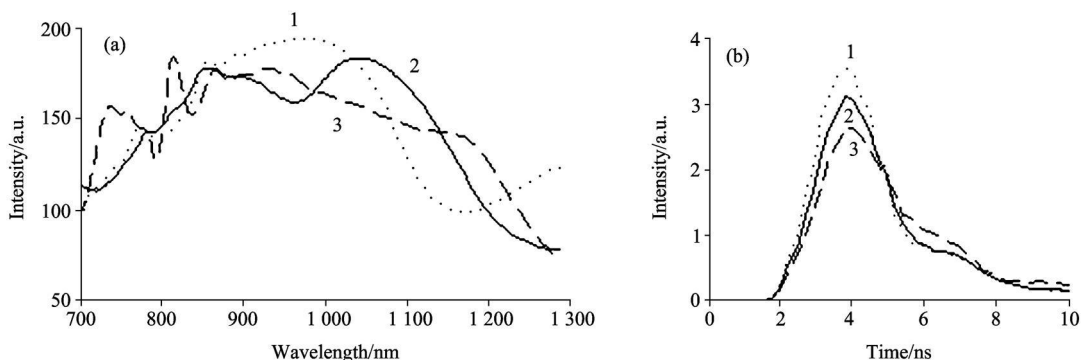


Fig 4 Triangle Si grating solar cells energy intensity for different heights of grating

(a): Change with wavelength; (b): Change with time

1: $h = 200$ nm; 2: $h = 320$ nm; 3: $h = 440$ nm

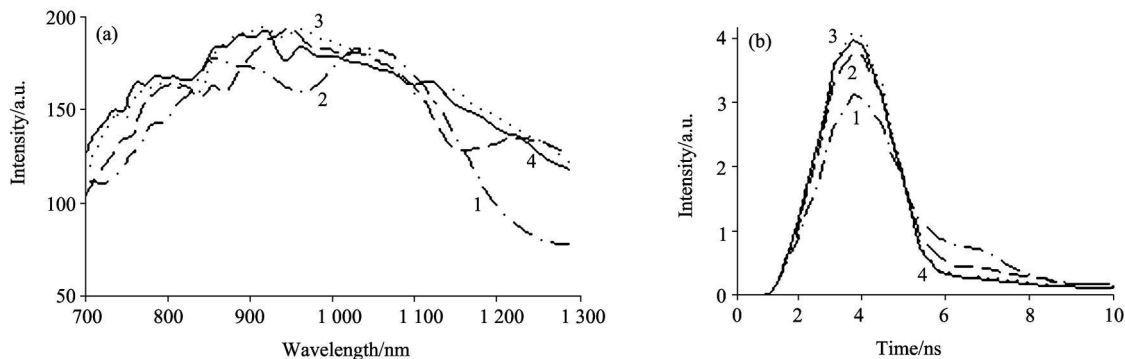


Fig 5 Triangle Si grating solar cells energy intensity for different coating thicknesses

(a): Change with wavelength; (b): Change with time

1: $t = 0$; 2: $t = 20$ nm; 3: $t = 40$ nm; 4: $t = 60$ nm

能电池储能随波长和随时间的变化曲线。从图 5(b) 中发现, 以 $t = 40 \text{ nm}$ 为临界点, 太阳能电池的储能强度先增加后降低, 这说明当镀层厚度过厚时, 反而会降低太阳能电池对光的吸收。这是因为亚波长金属镀层产生的表面等离子体可以极大地增强镀层下介质层内的透射光强, 但表面等离子体本身仅局限于金属镀层与硅板界面处, 镀层厚度增大, 金属镀层与硅板界面距离增大, 增强值减弱。

2 结 论

结果表明经光栅减反层优化表面结构的太阳能电池的光电转换效率显著增大, 储能效果得到提升。尤其是三角形光栅减反层太阳能电池储能效果显著, 光电转换效率得到增强。另外, 随着光栅表面镀层厚度的增加, 储能效果越明显。当镀层厚度过厚时, 反而会降低太阳能电池对光的吸收。

References

- [1] Wagner Lucas K, Grossman Jeffrey C. Phys. Rev. Lett., 2008, 101(26): 5501.
- [2] Martin A G, Keith Emery, David L K, et al. Pro. Photo. Res. & A, 2005, 13(5): 387.
- [3] Stiebig H, Senoussaoui N, Brammer T, et al. Solar Energy Mater. and Sol. Cells, 2006, 90(18-19): 3031.
- [4] ZHOU Ren-long, CHEN Xiao-shuang, ZENG Yong, et al(周仁龙, 陈效双, 曾 勇, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2008, 57(6): 3506.
- [5] Drori T, Sheng C X, Ndobe A, et al. Phys. Rev. Lett., 2008, 101(3): 7401.
- [6] GE De biao, YAN Yue bo(葛德彪, 闫玉波). Electromagnetic Finite-Difference Time-Domain Method(电磁波时域有限差分方法). Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press(西安: 西安电子科技大学出版社), 2005.

Research on the Photoelectric Conversion Efficiency of Grating Antireflective Layer Solar Cells

ZHONG Hui¹, GAO Yong-yi^{2*}, ZHOU Ren-long², ZHOU Bing-ju², TANG Li-qiang², WU Ling-xi², LI Hong-jian³

1. College of Electromechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China
2. College of Physics, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China
3. College of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract A numerical investigation of the effect of grating antireflective layer structure on the photoelectric conversion efficiency of solar cells was carried out by the finite-difference time-domain method. The influence of grating shape, height and the metal film thickness coated on grating surface on energy storage was analyzed in detail. It was found that the comparison between unoptimized and optimized surface grating structure on solar cells shows that the optimization of surface by grating significantly increases the energy storage capability and greatly improves the efficiency, especially of the photoelectric conversion efficiency and energy storage of the triangle grating. As the film thickness increases, energy storage effect increases, while as the film thickness is too thick, energy storage effect becomes lower and lower.

Keywords Solar cells; Photoelectric conversion efficiency; Finite-difference time-domain

(Received Oct. 15, 2010; accepted Jan. 20, 2011)

* Corresponding author