

文章编号:1001-5078(2011)08-0885-04

· 光学材料与器件 ·

一种基于光子晶体的高效太阳能电池反射器的设计

李文胜¹, 黄海铭¹, 付艳华¹, 张琴¹, 是度芳^{1,2}

(1. 湖北汽车工业学院理学系, 湖北 十堰 442002; 2. 华中科技大学物理系, 湖北 武汉 430074)

摘要:利用 SiO₂ 和 TiO₂ 介质, 设计了一种可用于太阳能电池反射器的一维光子晶体。采用传输矩阵法对该光子晶体从可见光至近红外波长范围的反射谱进行了模拟计算, 并分别讨论了周期数和入射角不同时反射谱的变化。结果表明: 光线垂直入射时, 周期数 N 增加, 其反射谱在短波段的禁带数增加、禁带宽度变窄, 而长波段的反射率增加。入射角 θ 增大时, 平均反射率增加, 因而该光子晶体具有良好的角度宽容性, 可作为高效的太阳能电池率反射器。

关键词:光子晶体; 太阳能电池; 反射器; 角度宽容性

中图分类号: O482.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.013

Design of highly efficient reflector of solar cells based on photonic crystal

LI Wen-sheng¹, HUANG Hai-ming¹, FU Yan-hua¹, ZHANG Qin¹, SHI Du-fang^{1,2}

(1. Department of Basic Science Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China;

2. Department of Physics of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: One dimensional photonic crystal is designed for solar cells reflector with medium SiO₂ and TiO₂. The reflection spectrum of the photonic crystal from visible light to near infrared wavelength is simulated with the transfer matrix method. The variations of reflection spectra at different incident angle and with different number of cycles are discussed respectively. The results indicate that at the normal incidence, the number of the band gap increases and the gap width narrows in the short wavelength as the number of cycles N increasing, whereas, the reflectivity increases in the long wavelength under the same condition. The average reflectance increases as the incident angle θ increasing; therefore the photonic crystal has better tolerance in angle, which can be used as the reflector to improve the efficiency of solar cells.

Key words: photonic crystal; solar cells; reflector; angle tolerance

1 引言

太阳能电池已广泛应用于军事、航天、工业、农业、家用电器等领域。但目前太阳能电池光电转换效率大约在 20% 左右, 如何减少投射到太阳能电池上光能的损失, 提高电池的转换效率是急待解决的一个重大课题。研究表明, 能量损失之一是长波光未能得到有效吸收^[1]。在太阳能电池背部设置高效的反射器, 可以使透过电池基体的长波光充分反射, 增加电池对长波光的吸收, 从而提高光的利用率。目前金属反射器和介质反射器应用较为广

泛^[2-3]。然而金属反射器因吸收较大而反射率较低^[4], 而介质反射器则因使用波长范围窄及对光线入射方向较为敏感而难以实现全角度反射^[5], 而近十年来所提出的光子晶体结构为解决上述问题提供了方便。光子晶体是不同的电介质在空间的一种周期分布, 其主要特点是存在光子禁带^[6]。我们可以通过设

基金项目:湖北省教育厅科研项目(No. B20110807)资助。

作者简介:李文胜(1955 -), 男, 副教授, 主要从事光学的教学与研究工作。E-mail: Liwensheng200099@sina.com

收稿日期:2011-03-04; **修订日期:**2011-03-22

计不同结构的光子晶体来控制光子禁带,从而实现对不同波长电磁波的反射,因此在制备高效全角度反射器方面具有独特的优越性。考虑到现行的太阳能电池对短波段能量吸收较高^[7],因而本文所设计的基于一维光子晶体的太阳能电池反射器,主要针对长波段(近红外范围),该反射器具有结构简洁、工艺简单、相应波段反射率高及角度宽容性良好等特性。为太阳能反射器的设计提供了一种新的方法。

2 计算模型和色散特性

本文所设计的一维光子晶体是由 SiO₂ 和 TiO₂ 两种介质薄层沿厚度方向交替排列组成,其周期数为 N ,如图 1 所示。

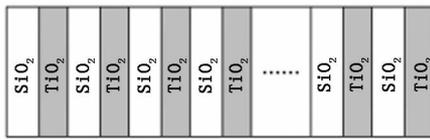


图1 由 SiO₂ 和 TiO₂ 组成的一维光子晶体模型

Fig.1 the model of 1-D photonic crystal composed of SiO₂ and TiO₂

为了使所得到的结果更具有实用价值,必须考虑这两种介质的色散,且其折射率应该用复折射率 $n(\lambda) = n_s(\lambda) + ik(\lambda)$ 来表示^[8],其中 n_s 和 k 分别是介质的折射率和吸收系数。根据文献 [8] 所提供的的数据,从紫外到近红外的波长(361.1 ~ 1660 nm)范围内, SiO₂ 的吸收系数 k_1 严格为零,而 TiO₂ 的吸收系数 k_2 在 464.55 ~ 1260 nm 的波长范围内严格为零,在 337.27 ~ 432.73 nm 的范围内近似为零。由上述文献所提供的的数据,不难得到它们的色散关系及拟合的结果分别如图 2 和图 3 所示。利用 Matlab 软件,容易得出 SiO₂ 和 TiO₂ 的色散关系拟合函数分别为式(1)、式(2)所示:

$$n_s(\lambda) = 0.3016\lambda^6 - 1.775\lambda^5 + 4.2667\lambda^4 - 5.3824\lambda^3 + 3.7878\lambda^2 - 1.4413\lambda + 1.6929 \quad (1)$$

$$n_T(\lambda) = 48.871\lambda^6 - 265.478\lambda^5 + 593.820\lambda^4 - 700.199\lambda^3 + 459.701\lambda^2 - 195.949\lambda + 25.871 \quad (2)$$

式中, λ 是入射光的波长,单位是微米。

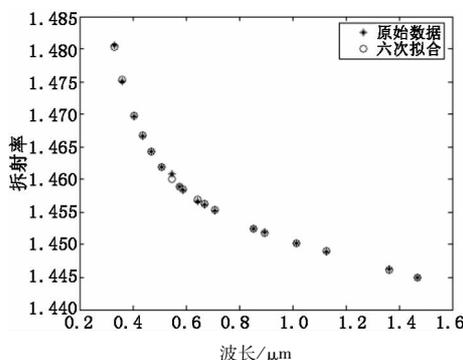


图2 SiO₂ 的色散关系和拟合结果

Fig.2 the dispersion relation and fitting results of SiO₂

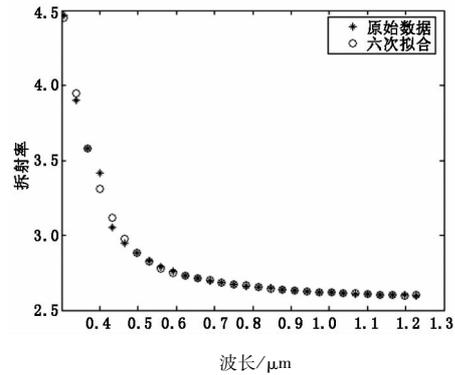


图3 TiO₂ 的色散关系和拟合结果

Fig.3 the dispersion relation and fitting results of TiO₂

3 计算方法及结果

由传输矩阵法可知^[9],图 1 所示的光子晶体的总传输矩阵为:

$$M = \prod_K M_{KS} M_{KT} \quad (3)$$

其中, M_{KS} 和 M_{KT} 分别是第 K 周期中 SiO₂ 和 TiO₂ 两介质的特征矩阵; N 为总周期数。对于第 K 周期中的 SiO₂ 介质层,其特征矩阵 M_{KS} 的具体表示为^[10]:

$$M_{KS} = \begin{bmatrix} \cos\delta_{KS} & i\sin\delta_{KS}/\eta_s \\ i\eta_s \sin\delta_{KS} & \cos\delta_{KS} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\delta_{KS} = 2\pi n_s d_s \cos\theta_s / \lambda$; n_s 如式(1)所示; d_s 是 SiO₂ 的几何厚度; η_s 是对应的导纳,对于 TE 波和 TM 波, η_s 由下式表示:

$$\eta_s = \begin{cases} n_s / \cos\theta_s & \text{TE 波} \\ n_s \cos\theta_s & \text{TM 波} \end{cases} \quad (5)$$

式中, θ_s 为第 k 周期中 SiO₂ 介质层内光线的折射角。而对 TiO₂ 介质层,其特征矩阵 M_{KS} 和矩阵元的表达式与上述的表示一一对应。若:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

则反射率为^[11]:

$$R = 1 - \frac{4\eta_a^2}{|\eta_a m_{11} + \eta_a^2 m_{12} + m_{21} + \eta_a m_{22}|^2} \quad (7)$$

式中, η_a 是光子晶体两侧介质(此处为空气)的导纳。

3.1 周期数 N 对反射谱的影响

数值计算时,两种介质的几何厚度分别取 $d_s = 0.1714 \mu\text{m}$, $d_T = 0.0878 \mu\text{m}$,周期数取 N 。在光线垂直入射,光子晶体的周期取不同值时,TE 波和 TM

波的反射谱如图 4 所示。

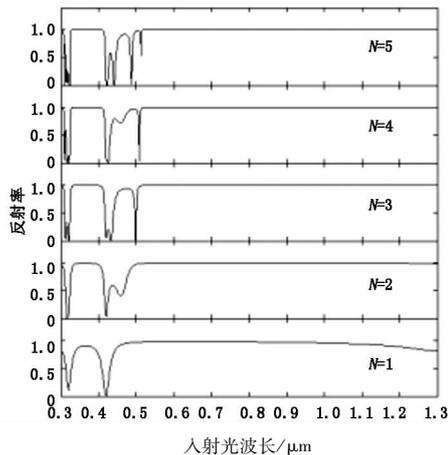


图 4 周期不同时 TE 波和 TM 波的反射谱

Fig.4 reflectivity spectra of TE and TM wave in different number of cycles

从图 4 可见,在光线垂直入射时,TE, TM 两波的反射谱完全相同,这是由式(5)所决定的。周期数 $N=1$ 时,在波长 λ 是 $0.3 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 的范围内,其反射谱比较简单:在 λ 为 $0.33 \mu\text{m}$ 和 $0.42 \mu\text{m}$ 处,有两个反射率分别为 0.15 和 0 的禁带,此两禁带间由一反射率是 0.95 的通带所隔。而当 λ 大于 $0.42 \mu\text{m}$ 后,随着 λ 的增大,其反射率急剧增加,当 $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ 时,其反射率已增至 1。入射光波长大于 $0.82 \mu\text{m}$ 时,其反射率缓慢降低,直至波长是 $1.3 \mu\text{m}$ 时反射率降至 0.82。随着周期数 N 的增加,其反射谱在短波段的禁带数增加、禁带宽度变窄,而长波段的反射率增加。周期数越大,这些变化越明显。当 $N=3$ 时,其长波段的反射率已恒为 1。尽管进一步的计算表明, N 越大,其长波段达到反射率为 1 的波长区间也越大,但考虑到制备成本和工艺,上述光子晶体的周期数取 $N=3$ 较为合理。当 N 取 3 时,尽管在 $0.3 \sim 0.51 \mu\text{m}$ 的波长范围内还有几个反射率很小甚至为 0 的禁带,但由于现行的太阳能电池对此波段的太阳光已有较充分的吸收^[12],故这几个禁带对反射器的影响可以不考虑。

3.2 入射角对反射谱的影响

为了考察上述反射器的角度宽容性,取周期数 $N=3$,入射角 θ 分别取 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 75° 时,TE 波和 TM 波的反射谱分别如图 5 中实、虚线所示。

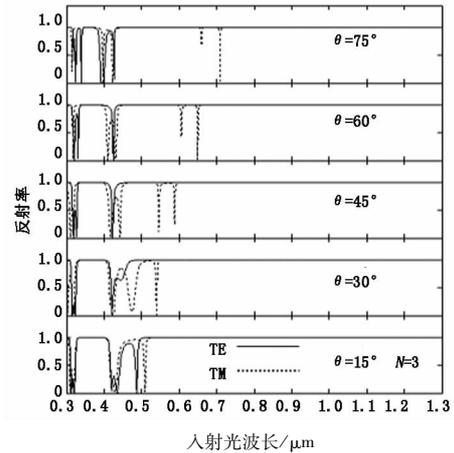


图 5 不同角度入射下 TE 波和 TM 波的反射谱

Fig.5 reflectivity spectra of TE and TM wave in different incident angle

从图 5 可见,当入射角 $\theta = 15^\circ$ 时,TE 和 TM 两波的反射谱基本相同:在长波段的反射率恒等于 1,而在短波段有 3 个反射率为零的禁带,且 TE 波最后(波长最大的)一个禁带所对应的波长小于 TM 波相应禁带所对应的波长。从图中还可见,TE, TM 两波反射谱随入射角 θ 的变化规律不尽相同。 θ 增加时,TE 波最后一个禁带的位置发生蓝移,宽度变窄,从而对应区间内的平均反射率增加。而 TM 波最后一个禁带的位置发生红移,宽度也变窄,对应区间内的平均反射率也增加。无论是 TE 波还是 TM 波,入射角越大,平均反射率也越大。由此可见,此反射器具有良好的角度宽容性。

4 结论

采用 SiO_2 和 TiO_2 两种常见的介质,设计了一种可用于太阳能反射器的一维光子晶体。利用传输矩阵法对该结构从可见至近红外波长范围内的反射谱进行了模拟计算,并分别讨论了周期数 N 和入射角度变化时,TE 和 TM 两波反射谱的变化规律。结果表明:垂直入射时,TE 和 TM 两波的反射谱完全相同;周期数 N 增加时,反射谱在短波段的禁带数增加、禁带宽度变窄,而长波段的反射率增加,所讨论的波长区间内的平均反射率增加。考虑到制备成本和工艺,上述光子晶体的周期数取 $N=3$ 较为合理。入射角 θ 增大时,两波反射谱的变化规律不尽相同,但两波的禁带宽度变窄,平均反射率增加,此反射器具有良好的角度宽容性,并有很高的平均反射率。由此可见本文所设计的一维光子晶体结构能够提供极大的全方位反射带,为制作覆盖整个近红外波段的高效全方位太阳能电池反射器寻找到一种

可行的途径,对提高太阳能电池效率的理论和实验研究具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] Zhao L, Zuo Y H, Zhou C L, et al. A highly efficient light trapping structure for thin film silicon solar cells [J]. *Solar Energy*, 2010, 84(1): 110 - 115.
- [2] Tucci M, Sereno L, Salza E, et al. Bragg reflector and laser fired back contact in a-Si:H/c-Si heterostructure solar cell [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2009, 159 - 160: 48 - 52.
- [3] Minemoto T, Murozono M, Yamaguchi Y, et al. Design strategy and development of spherical silicon solar cell with semi-concentration reflector system [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2006, 90(18 - 19): 3009 - 3013.
- [4] Lu Hui, Tian Hui-ping, Li Chang-hong, et al. Large absolute band gaps of 2D photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1414 - 1418. (in Chinese)
鲁辉, 田慧平, 李长红, 等. 大带隙二维光子晶体结构的研究 [J]. *光子学报*, 2009, 38(6): 1414 - 1418.
- [5] Dela Moramb, Jaramillo O A, Navar, et al. Viability study of porous silicon photonic mirrors as secondary reflector for solar concentration systems [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, 93(8): 1218 - 1224.
- [6] Lin C, Tsai J, Kao C, et al. Enhanced light output in InGaN-based light-emitting diodes with omnidirectional one-dimensional photonic crystals [J]. *JpnJ Appl Phys*, 2006, 45(3A): 1591 - 1593.
- [7] Ye Honggang, Chen Guangde. Omnidirectional reflector of combined one-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(8): 1245 - 1248. (in Chinese)
- 耶红刚, 陈光德. 组合一维光子晶体全能反射器 [J]. *光子学报*, 2005, 34(8): 1245 - 1248.
- [8] E ward D. Palik handbook of optics [M]. Yang Xia Sun. transl. Beijing: Science Press, 1982.
- [9] Cory H, Zach C. Wave propagation in metamaterial multilayered structures [J]. *Microw. and Opt. Thch. Lett.*, 2004, 40(6): 460 - 465.
- [10] Xue Hui, Zheng Zhengrong, Gu Peifu, et al. A novel filter with low angle effect [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(6): 3983 - 3987. (in Chinese)
薛晖, 郑臻荣, 顾培夫, 等. 一种新型的低角度效应的滤波器 [J]. *物理学报*, 2009, 58(6): 3983 - 3987.
- [11] Li Xiujie, Han Peide, Yang Yibiao, et al. Reflector of solar cells based on photonic crystal heterostructures [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(10): 1786 - 1789. (in Chinese)
李秀杰, 韩培德, 杨毅彪, 等. 基于光子晶体异质结高效太阳能电池反射器研究 [J]. *光子学报*, 2010, 39(10): 1786 - 1789.
- [12] Li Wenshang, Fu Yanhua, Shi Dufang. The response between wavelength and angular of band gaps of quasi-periodic 1-D photonic crystal for different polarizations [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(11): 1206 - 1209. (in Chinese)
李文胜, 付艳华, 是度芳. 准周期光子晶体的透射率对不同偏振态的波长和角度响应 [J]. *激光与红外*, 2009, 39(11): 1206 - 1209.