

文章编号:1004-4213(2010)10-1786-4

基于光子晶体异质结的高效太阳能电池反射器研究*

李秀杰^a, 韩培德^a, 杨毅彪^b, 梁伟^a

(太原理工大学 a. 材料科学与工程学院; b. 理学院, 太原 030024)

摘 要:设计了一种可用于太阳能电池反射器的二维三角晶格光子晶体异质结结构. 采用传输矩阵法对该结构在可见至近红外波长范围入射电磁波的反射率进行了模拟计算, 并比较了不同入射方向下反射率的变化. 结果表明, 光线垂直入射时, 该结构光子晶体对近红外波段入射光可实现完全反射; 随着偏转角度的增大, 在整个可见-近红外波段均显示出极高的反射特性. 该结构有望用于制作覆盖整个可见光-近红外波段的高效全方位反射器.

关键词:光子晶体; 太阳能电池; 反射器; 异质结; 三角晶格

中图分类号: O482.3

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103910.1786

0 引言

近年来太阳能电池产业发展迅速, 已广泛应用于军事、航天、工业、农业、家用电器等领域. 目前太阳能电池光电转换效率大约在 20% 左右, 如何充分利用太阳能, 提高电池效率是急需解决的一个重大课题. 研究表明投射到太阳能电池上的光能只能有一少部分能够转变为电能, 能量的损失一方面是长波长光子未能得到有效吸收; 另一方面能量大于禁带宽度的短波长光子激发电子-空穴对后, 多余的能量没有得到充分利用. 对于传统硅太阳能电池, 这两部分损失占到了入射光线总能量的 56%^[1]. 太阳能电池背部反射器可以反射透过电池基体到达背表面的光, 增加电池对长波光的吸收, 从而增加光的利用率, 使短路电流增加, 同时还能避免因电池温度升高导致的效率下降. 目前金属反射器和介质反射器应用较为广泛^[2-4]. 然而金属反射器因吸收较大而无法获得高反射率. 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. 由于光子晶体可以通过设计不同结构, 来控制光子禁带^[5], 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^[1, 6-9]. 为获得较大范围的电磁波反射, 要求光子晶体反射器具有大的禁带带宽, 已有的研究大都将多个光子晶体进行堆垛来实现^[10-13], 如此虽使带宽得到一定改善, 反射器的工作范围增大, 但势必增加了制备的难度.

本文设计了一种二维三角晶格圆柱晶胞光子晶体异质结, 结构简单、加工工艺成熟, 在可见-近红外波长范围, 尤其在近红外范围具有全方位反射的优异特性, 为太阳能反射器的发展提供了一种新的可能.

1 模型和计算方法

所设计光子晶体异质结如图 1 所示, 该结构由两个三角晶格圆柱晶胞的二维光子晶体组成, 分别用 Pc_1 和 Pc_2 表示. 两个光子晶体晶格常数均为 a , 圆柱半径为 r , 背景介质为半导体材料 Si, 圆柱为空气柱. Pc_1 和 Pc_2 中空气柱的半径分别为 $0.45a$ 和 $0.4a$, 填充比分别为 0.42 和 0.27 . 图中 θ 为入射光线的偏转角度, p 为 Pc_1 和 Pc_2 的层数.

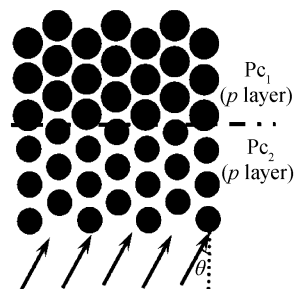


图 1 二维光子晶体异质结示意图
Fig. 1 Schematic representation for two-dimensional photonic crystal heterostructure

传输矩阵法^[14]通过求解麦克斯韦方程以得到光子晶体的反射性质, 是光子晶体理论计算中常用的一种数值计算方法. 本文采用传输矩阵法对以上所建模型在可见至近红外波段的 TE 模和 TM 模光子禁带进行了模拟计算.

* 国家自然科学基金(50874079)和山西省留学人员科技活动项目(091003)资助

Tel: 0351-6018398

Email: showjietyut@126.com

收稿日期: 2010-05-19

修回日期: 2010-07-19

2 结果与讨论

考虑到半导体材料 Si 在可见-近红外 (400 ~ 1 200 nm) 范围的高频区具有较大的色散, 本文在计算过程中对材料折射率按变化 5% 的间隔划分光波波段, 在各个波段内分别计算光子晶体的反射率, 再叠加得到整个可见-近红外波长范围的 TE 和 TM 模反射率曲线, 这样可有效保证计算结果的准确性. 图 2 为 25 °C 时, Si 折射率随入射波长的变化曲线, 其中 n 为实部, k 为虚部. 由于虚部在可见至近红外的波长范围内很小, 可忽略不计.

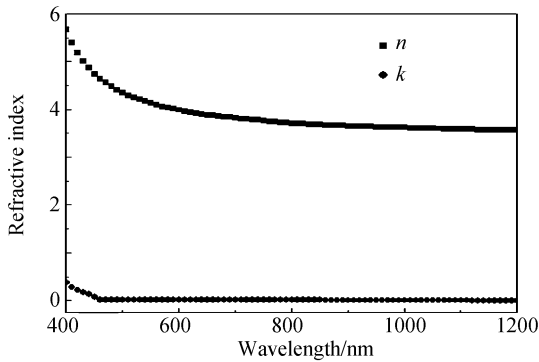


图 2 25 °C 时硅的折射率与电磁波长的关系曲线

Fig. 2 Refractive index dispersion profiles for Silicon at 25 °C

图 3、图 4 分别为光线垂直入射时, 不同层数 P_{C_1}/P_{C_2} 所对应的 TE、TM 模式反射率曲线. 比较各图可得, 当层数 $p \geq 21$ 时, 反射率曲线已基本稳定. 以下分析讨论均采用层数 p 为 21.

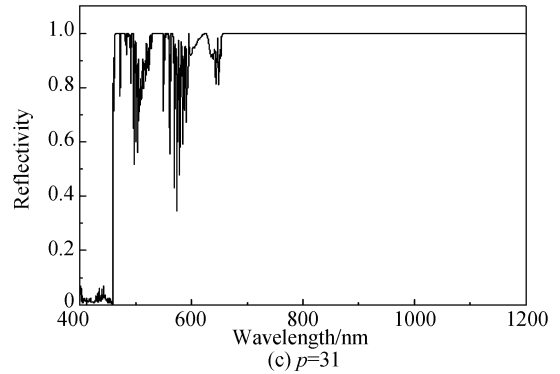
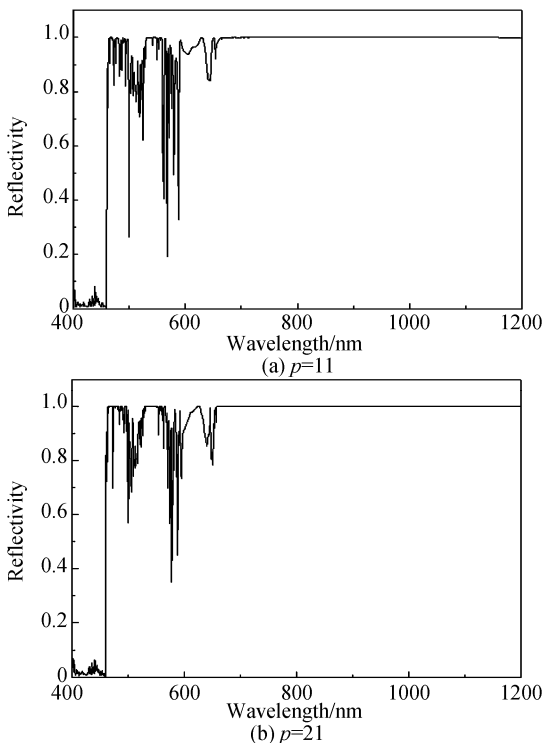


图 3 光线垂直入射时, 不同层数 P_{C_1}/P_{C_2} 的 TE 偏振模式反射谱

Fig. 3 Reflectivity of P_{C_1}/P_{C_2} at normal incidence for TE polarization with different layers

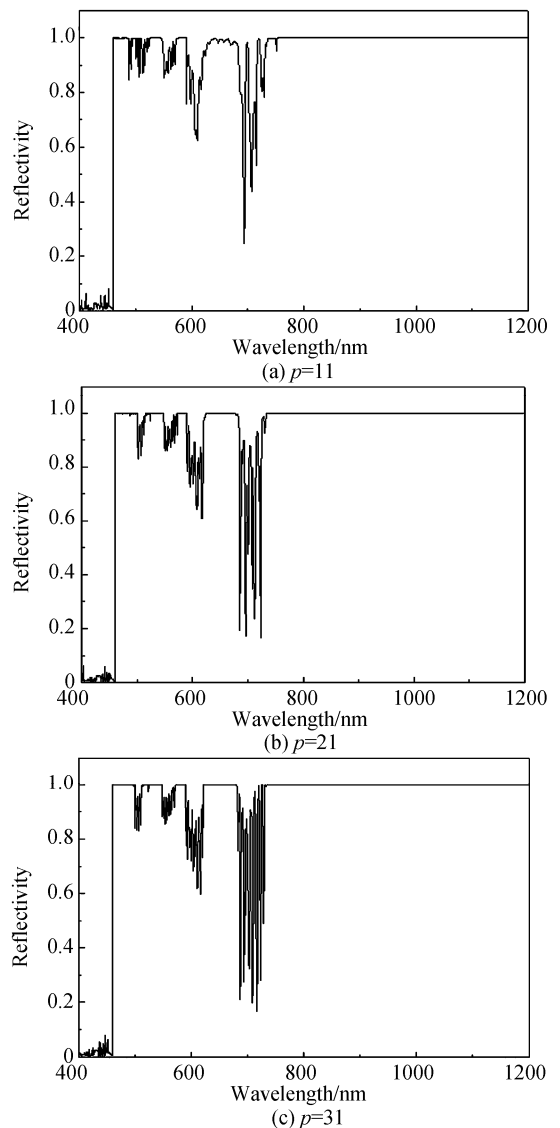


图 4 光线垂直入射时, 不同层数 P_{C_1}/P_{C_2} 的 TM 偏振模式反射谱

Fig. 4 Reflectivity of P_{C_1}/P_{C_2} at normal incidence for TM polarization with different layers

由图 3、图 4 可知,光线垂直入射时,TE 模的光子禁带范围出现在 670~1 200 nm,而 TM 模则在 750~1 200 nm 区间出现光子禁带,重叠光子禁带在 750~1 200 nm 波长范围,此波长范围所对应的近红外入射光线可被完全反射.这意味着长波长光子能够零损耗的被重新反射回电池中,使其在电池体内的吸收路径得以延长,提高光电转换效率.该结构在波长为 460~750 nm 的可见光范围虽然没有重叠光子禁带,但反射率平均仍可达 94%.在 400~460 nm 波长范围内没有 TE 和 TM 模的禁带,反射率则近乎为零.但由于目前太阳能电池对短波长范围的可见光线吸收较充分,反射器接收到的光线主要集中在长波长的近红外范围,因此该结构仍能实现较好的反射效率.

偏转入射光线至 30° ($\theta=30^\circ$) 时的反射曲线如图 5 所示. TM 模式在 870~1 050 nm 范围内没有禁带产生,反射率有一定降低,但在 750~1 200 nm 近红外波长范围内,TE、TM 的总反射率仍可达到 92%,在 400~750 nm 可见光波段内,反射率平均也达到了 90%,总体上仍能较好满足反射要求.

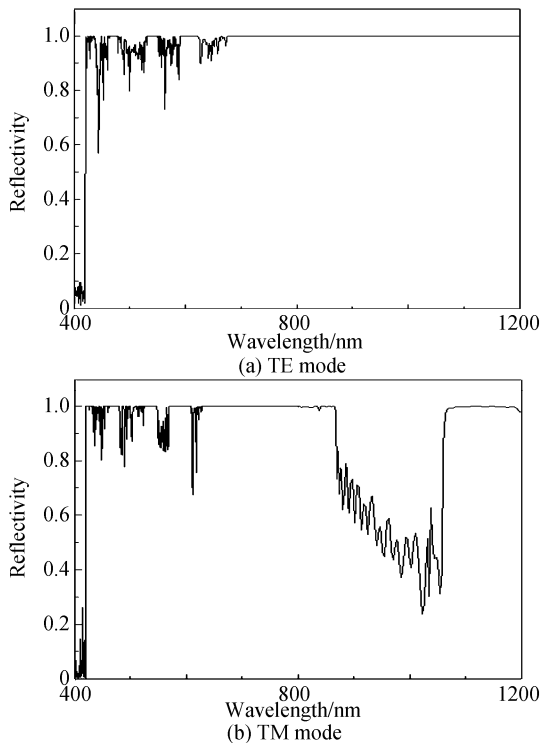


图 5 光线入射角度为 30° 时, PC_1/PC_2 的反射率曲线
Fig. 5 Reflectivity of PC_1/PC_2 with 21 layers at 30° incidence angle

图 6、图 7 分别为入射光线偏转角度 60° 和 89° 时的反射率曲线,可以发现 θ 为 60° 时,TE、TM 的重叠禁带宽度进一步增大,对于 400~1 200 nm 波长范围内的入射光该结构的平均反射率为 99%;偏转角度为 89° 时反射率则达到了 99.4%,几乎在整

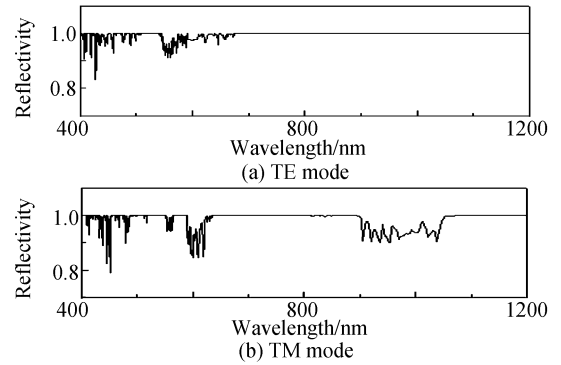


图 6 光线入射角度为 60° 时, PC_1/PC_2 的反射率曲线
Fig. 6 Reflectivity of PC_1/PC_2 with 21 layers at 60° incidence angle

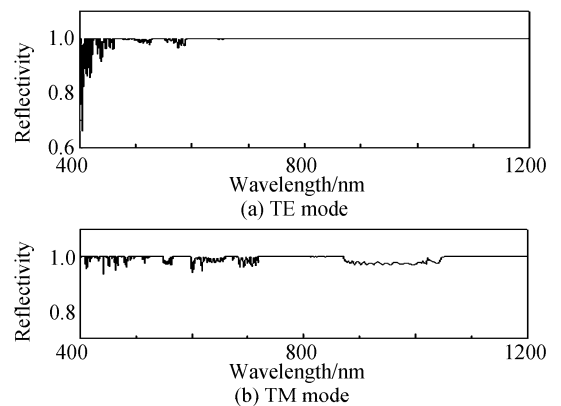


图 7 光线入射角度为 89° 时, PC_1/PC_2 的反射率曲线
Fig. 7 Reflectivity of PC_1/PC_2 with 21 layers at 89° incidence angle

个研究波长范围达到完全反射.

3 结论

本文设计了一种可用于太阳能反射器的二维三角晶格圆柱晶胞光子晶体异质结结构,采用传输矩阵法对该结构在可见至近红外波长范围内的反射率进行了模拟计算,并比较了光线垂直入射与偏转角度分别为 30° 、 60° 、 89° 时反射率的变化.发现在光线垂直入射时,该结构在 750~1 200 nm 波段具有 TE 和 TM 模重叠的光子禁带,对该波长范围所对应的近红外入射光可实现完全反射;在 460~750 nm 仍大范围存在 TE 和 TM 模的禁带,反射率平均可达 94%.入射光线偏转 30° 时,该结构对 870~1 050 nm 波段入射光的反射效率有所下降,但对近红外区间入射光的整体反射率仍可达到 92%.继续增大偏转角度至 60° 和 89° ,则在可见光-近红外波长的极大范围内,平均反射率均达到 99% 以上.因此本文所设计的二维光子晶体异质结不仅能够提供极大的全方位反射带,为制作覆盖整个可见光-近红外波段的高效全方位反射器寻找到一种可行的途径,而且该结构制备工艺简单、容易实现,具有重要的参考价值.

参考文献

- [1] FLORESCU M, LEE H, PUSCASU I, *et al.* Improving solar cell efficiency using photonic band-gap materials[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2007, **91**(17):1599-1610.
- [2] 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.
- [3] TUCCI M, SERENELLI 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
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.
- [6] de la MORA M B, JARAMILLO O A, NAVA R, *et al.* Viability study of porous silicon photonic mirrors as secondary reflectors for solar concentration systems[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, **93**(8): 1218-1224.
- [7] RODRIGUEZ I, ATIENZAR P, RAMIRO-MANZANO F, *et al.* Photonic crystals for applications in photoelectrochemical processes Photoelectrochemical solar cells with inverse opal topology[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2005, **3**(2-3): 148-154.
- [8] CHEN M, LI C F, XU M, *et al.* Eye-protection glasses against YAG laser injury based on the bandgap reflection of one-dimensional photonic crystal[J]. *Opt Laser Technol*, 2007, **39**(1): 214-218.
- [9] LIN C, TSAI J, KAO C, *et al.* Enhanced light output in InGaN-based light-emitting diodes with omnidirectional one-dimensional photonic crystals[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2006, **45**(3A): 1591-1593.
- [10] YE Hong-gang, CHEN Guang-de. Omnidirectional reflector of combined one-dimensional photonic crystal. [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1245-1248.
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.
- [11] QIANG Hai-xia, JIANG Li-yong, LI Xiang-yin. Design of broad omnidirectional total reflectors based on one-dimensional dielectric and magnetic photonic crystals[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, **42**(1): 105-109.
- [12] JIANG L Y, ZHENG G G, SHI L X, *et al.* Broad omnidirectional reflector design for optical telecommunications band using genetic algorithm[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2008, **47**(8): 6333-6336.
- [13] LI X, XUE W, JIANG Y R, *et al.* Optimized design and experiment of one-dimensional omnidirectional reflector using P-wave angle domain compensated overlapping method[J]. *Chin Opt Lett*, 2007, **5**(11): 665-667.
- [14] LI Zhi-yuan, HO Kai-ming. Application of structural symmetries in the plane-wave-based transfer-matrix method for three-dimensional photonic crystal waveguides[J]. *Phys Rev B*, 2003, **68**(24): 245117-245137.

Reflector of Solar Cells Based on Photonic Crystal Heterostructures

LI Xiu-jie^a, HAN Pei-de^a, YANG Yi-biao^b, LIANG Wei^a

(*a*, College of Materials Science and Engineering; *b*, Department of Applied Physics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A two-dimensional triangular lattice photonic crystal heterostructure is designed for solar reflector. The reflectivity of the incident electromagnetic wave in the visible to near infrared wavelength range is simulated by the transfer matrix method and the variation of reflectivity with different incident angle is studied. The results shows that the structure displays perfect reflection for the near-infrared incident light at normal incidence. As the deflection angle increases, it shows high reflectance in visible-near infrared wavelength range. The structure should enable new application for omnidirectional total reflector for the visible to near infrared light.

Key words: Photonic crystal; Solar cell; Reflector; Heterostructure; Triangular lattice



LI Xiu-jie was born in 1975. She received the M. S. degree from Department of Materials Science, Lanzhou University in 2000. Now she is a Ph. D. degree candidate at Taiyuan University of Technology and her research interests focus on the theory and application of photonic crystals.



LIANG Wei was born in 1963. He received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 1997. Now his research interests focus on the photocatalytic and photovoltaic materials.