

doi: 10.3788/gzxb20164505.0516002

# 一维三元异质结构光子晶体反射特性

邓立儿, 巩蕾

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710072)

**摘要:** 利用传输矩阵法对一维三元光子晶体异质结构的光学特性进行了研究, 讨论了介质层厚无序度对三元结构光子禁带的影响. 研究表明, 将具有相互交叠光子禁带的一维光子晶体叠加构成异质结, 可以有效地增大全角度反射的频率范围, 当入射角从  $0^\circ$  增大到  $89^\circ$ , 该结构均可实现从  $0.410\omega/\omega_0$  到  $0.654\omega/\omega_0$  宽频段的全反射; 相对于二元结构, 三元结构可以减小在实际制作过程中随机误差引起的介质层厚无序对光子带隙的影响. 该研究结果可为实现可见光及红外光波段大角度反射器的制备及应用提供理论支持.

**关键词:** 光子晶体; 异质结; 传输矩阵法; 完全光子禁带; 三元结构

中图分类号: O431

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)05-0516002-5

## Reflection Characteristics of One-dimensional Polybasic Photonic Crystals by Using Heterostructure

DENG Li-er, GONG Lei

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** The reflection characteristics of one-dimensional polybasic photonic crystals by using heterostructure were studied by transfer matrix method. The influence of the disorder of three element compound dielectric layers was mainly discussed. The results indicate that the heterostructure consists of two one-dimensional polybasic photonic crystals with suitable photonic bandgap can substantially enlarge omnidirectional reflection frequency range. When the incident angle is in the range of  $0^\circ \sim 89^\circ$ , the band of total reflection can be achieved from  $0.410\omega/\omega_0$  to  $0.785\omega/\omega_0$ . Completed with the two element compound dielectric layers, three element photonic crystals can decrease the influence of the disorder produced in crystal preparation process. The results provide theoretical support for the preparation and application of wide-angle reflector invisible and infrared light band.

**Key words:** Photonic crystal; Heterostructure; Transfer matrix method; Complete photonic bandgap; Three element

**OCIS Codes:** 160.5298; 160.5293; 160.4670

## 0 引言

反射镜在光学技术中有着广泛的应用. 它的性能指标包括工作带宽、使用的入射角度范围、反射率等. 传统的光学反射镜有金属镜和多层介质镜两种. 前者工作的角度范围和带宽较大, 但在高频区域由于金属的吸收损耗反射率有限; 多层介质镜能够达到很高的反射率, 但是工作的角度范围和带宽非常小. 1998 年

Yoel Fink<sup>[1]</sup> 提出利用一维光子晶体<sup>[2-4]</sup> 在其禁带区的高反射将其作为反射镜, 由于具有完全带隙的光子晶体可以反射从任何方向入射的一定频率范围的光, 如果入射光的频率落入光子晶体的带隙<sup>[5-6]</sup> 中, 其理论反射率可以达到 100%. 光子晶体反射器所用材料选择范围宽, 反射率高, 可实现对不同角度入射光的全反射<sup>[7-8]</sup>, 因此也被称为第三代反射器.

由于光子晶体禁带会随着光线入射角的增大向短

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61308071)和陕西省教育厅专项科研项目(No. 15JK1336)资助

第一作者: 邓立儿(1983-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为基于光子晶体的光电子器件. Email: 284072453@qq.com

收稿日期: 2015-11-05; 录用日期: 2015-12-25

<http://www.photon.ac.cn>

波方向移动,因而由两种材料组成的简单结构一维光子晶体,仅可实现光线小角度入射时的全反射<sup>[9-10]</sup>,无法实现全方向完全反射.为解决这个问题,复旦大学剑等将具有相互重叠光子禁带的一维光子晶体叠加构成异质结,这种异质结构能有效地增大全角度反射的频率范围<sup>[11]</sup>.利用同一思路,2011年,韩培德等使用 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 MgF<sub>2</sub> 两种材料,通过晶体叠加实现了 414 nm~717 nm 的全角度反射<sup>[12]</sup>.2014年,杨毅彪等设计得到了可见光波段大角度反射器<sup>[13]</sup>,并将其用于太阳能电池背部反射板<sup>[14]</sup>,理论上可以得到在可见光波段的全角度反射.但是一维晶体在实际制备过程中,很难将各层介质厚度在纳米尺度上精确控制,不可避免地存在着厚度的无序起伏,由此导致实际制备得到的光子晶体禁带相对于理论计算值有偏离.研究表明,三元光子晶体(单周期由三种不同材料构成)由于其介电常量的多样化分布,光子禁带由于厚度起伏引起的变化小于一元的二元光子晶体,具有不同于二元光子晶体的光学特性<sup>[15]</sup>.因此,本文设计了一种一维三元异质结构的全方向反射镜,利用光学传输理论,对其不同角度入射时的反射特性进行研究,并讨论无序度相同情况下三元结构及二元结构禁带相对于理想情况时的禁带变化,为光子晶体反射镜的实际制备提供理论指导.

## 1 计算方法和结构模型

在光子晶体的各种计算方法中,传输矩阵法<sup>[16]</sup>计算量相对较小,精确度好,可以计算有限周期晶体的能带结构,得到反射率和透射率,可以为实际制作反射器的参量选择提供依据,本文采用传输矩阵法进行器件的反射特性研究.

由同种材料,不同填充比的两种一维光子晶体叠加构成的异质结构光子晶体如图 1,它由两个三元光子晶体 PC1, PC2 叠加而成,表示为 PC1/PC2.其中 PC1, PC2 均由折射率分别为 3.6, 1.2, 1.6 的 a, b, c 三种介质膜构成,考虑晶体的缩放性,两种晶体中各介质层厚度使用参考波长表示,分别为:PC1:  $L_a = 0.25\lambda_0$ ,  $L_b = 0.1\lambda_0$ ,  $L_c = 0.17\lambda_0$ ; PC2:  $L_a = 0.2\lambda_0$ ,  $L_b = 0.25\lambda_0$ ,  $L_c = 0.65\lambda_0$  ( $\lambda_0$  为参考波长,由其得到的参考

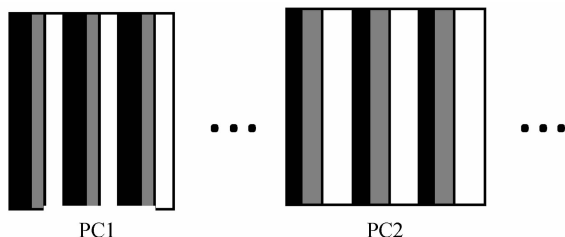


图 1 三元异质结构光子晶体结构

Fig. 1 Schematic representation of heterostructure consisting of polybasic photonic crystals

圆频率为  $\omega_0$ ), PC1 和 PC2 的周期数均为 10.

## 2 计算分析

### 2.1 异质结对全角度反射带的扩宽

图 2 为单一结构 PC1 和 PC2 的光子禁带随光线入射角的变化曲线,横坐标为光线入射角度,纵坐标为光波相对频率.图中阴影部分为禁带区域,也就是高反区域,白色部分为导带区域.考虑入射光波的偏振状态,在光线入射角较小时,TE 和 TM 两种偏振光波的禁带基本重合,随着入射角度的增加,TE 和 TM 波的禁带均向高频移动,但变化趋势不同. TE 波随着入射角度的增大禁带宽度逐渐增大,而 TM 波随着入射角度的增大禁带宽度有所减小,因而 TM 波的禁带完全处在 TE 波的禁带之中, TM 波的全角度反射带即为任意入射角度时任意偏振光线的全角度反射带.

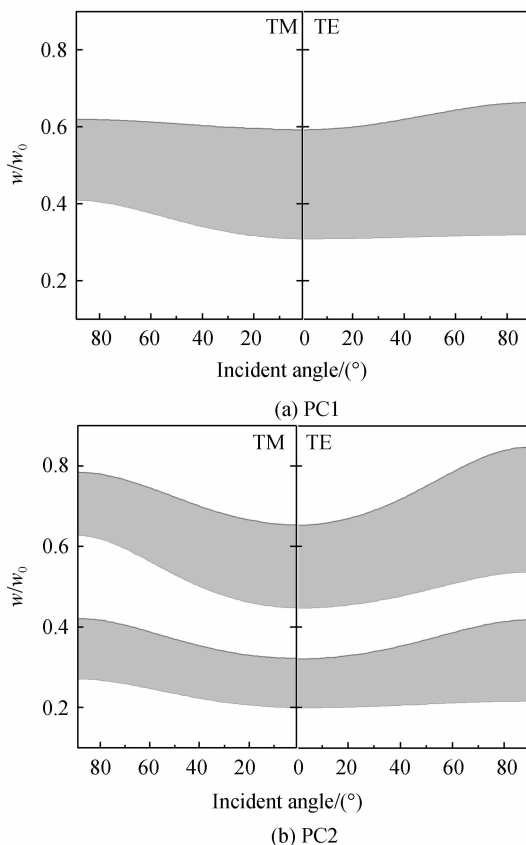


图 2 不同入射角度下 TE 模式和 TM 模式光子禁带  
Fig. 2 Photonic band gaps in terms of frequency and incidence angle

从图 2 可以看出,两个一维光子晶体全角度反射带的频率范围都取决于 TM 光波 90° 入射时下能带的上频边和 0° 入射时上能带的下频边.对于 PC1,计算得到 TM 模式的全角度反射带是从  $0.410\omega/\omega_0$  到  $0.592\omega/\omega_0$ .对于 PC2,在图中所显示的频率范围内有三个通带和两个反射带, TM 模式光波的两个全反带

的频率范围分别是  $0.270\omega/\omega_0$  到  $0.321\omega/\omega_0$  以及  $0.628\omega/\omega_0$  到  $0.654\omega/\omega_0$ .

通过合理地选择材料折射率及 PC1、PC2 中各介质层的厚度可以得到,从  $0^\circ$  到  $90^\circ$ , PC1、PC2 的光子禁带都是有重叠区域的,这种禁带结构是扩宽全反射频率范围的关键.任意入射角度下,频率处于 PC1 或 PC2 禁带中的电磁波均会被这种异质结构全反射,即为频域叠加,叠加后的异质结光子晶体禁带为各单体光子晶体禁带之和.

图 3 为光线入射角分别为  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $89^\circ$  时单光子晶体 PC1, PC2 及异质结 PC1/PC2 的透射光谱.以反射率为 99% 为标准计算得到,正入射时,光子晶体 PC1

的反射带为  $0.312\omega/\omega_0$  到  $0.592\omega/\omega_0$ , 光子晶体 PC2 的反射带为  $0.205\omega/\omega_0$  到  $0.321\omega/\omega_0$ , 以及  $0.449\omega/\omega_0$  到  $0.654\omega/\omega_0$ . 二者叠加合成的异质结 PC1/PC2 的反射带增大为  $0.205\omega/\omega_0$  到  $0.654\omega/\omega_0$ .  $45^\circ$  入射时, PC1 的反射带是  $0.351\omega/\omega_0$  到  $0.605\omega/\omega_0$ , PC2 的反射带是  $0.229\omega/\omega_0$  到  $0.360\omega/\omega_0$ , 以及  $0.449\omega/\omega_0$  到  $0.654\omega/\omega_0$ . 二者叠加合成的异质结 PC1/PC2 的反射带增大为  $0.205\omega/\omega_0$  到  $0.654\omega/\omega_0$ .  $45^\circ$  入射时, PC1 的反射带是  $0.351\omega/\omega_0$  到  $0.605\omega/\omega_0$ , PC2 的反射带是  $0.229\omega/\omega_0$  到  $0.360\omega/\omega_0$ , 以及  $0.516\omega/\omega_0$  到  $0.714\omega/\omega_0$ , PC1/PC2 的反射带增大为  $0.289\omega/\omega_0$  到  $0.714\omega/\omega_0$ .  $89^\circ$  入射时, PC1 反射带为

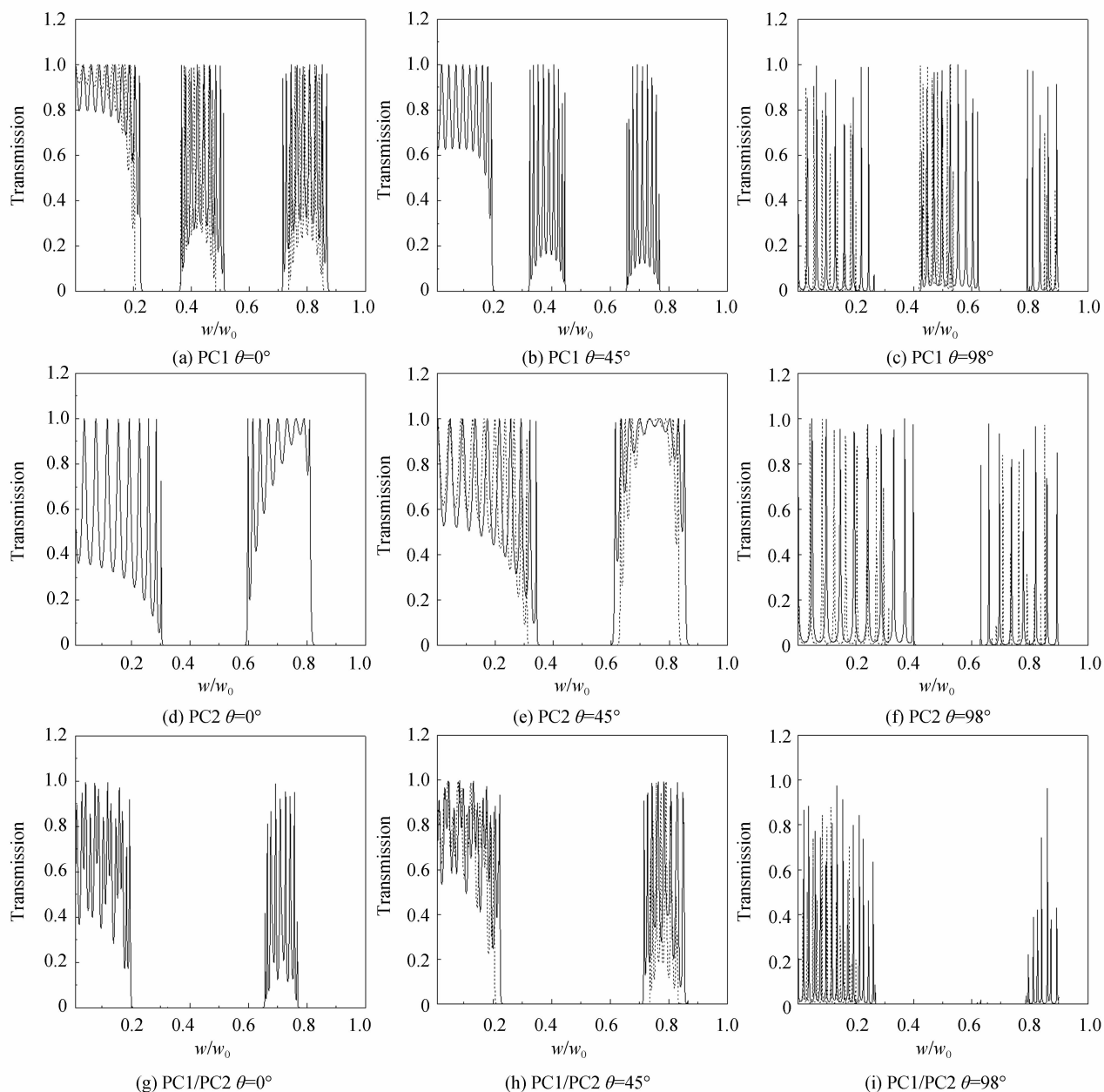


图 3 不同角度入射下光子晶体的透射光谱,图中实线表示 TE 模式,虚线表示 TM 模式  
 Fig. 3 Calculated transmission of photonic crystal at different incidentangle, the solid and dashed lines stand for TE and TM polarizations, respectiv

0.415 $\omega/\omega_0$  到 0.619 $\omega/\omega_0$ , PC2 是由 0.273 $\omega/\omega_0$  到 0.420 $\omega/\omega_0$ , 以及 0.628 $\omega/\omega_0$  到 0.788 $\omega/\omega_0$ . PC1/PC2 反射带增大为 0.415 $\omega/\omega_0$  到 0.788 $\omega/\omega_0$ .

可以看出, 无论是单体光子晶体 PC1、PC2 还是由此构成的异质结光子晶体 PC1/PC2, 当入射光的角度逐渐增大时, 其禁带均会向短波方向移动, 从而使全反带范围减小. 但由于异质结构可以将 PC1 和 PC2 各自的禁带连通起来, 从而形成一个在 0.410 $\omega/\omega_0$  到 0.654 $\omega/\omega_0$  频率范围内的全角度反射带, 反射率高达 99%. 在实际应用中, 如制作微波天线反射面, 太阳能电池背反射面, 或者发光二极管反射面等, 可以通过恰当地选取参考波长, 也就是选取各周期单元的材料厚度, 得到所需的各种不同波段的全角度反射带.

因此, 利用异质结构可以有效地扩大全角度反射带. 可以推论, 将多个具有合适能带结构的光子晶体叠加, 可以得到更宽范围的全角度反射带.

### 2.2 介质层厚度无序对光子禁带的影响

在光子晶体实际制备时, 难免受各种因素的影响, 使各介质层的实际厚度相对于理想值有所起伏, 因此考虑无序度对异质结光子禁带的影响. 引用文献 [15] 中对无序度  $D$  的定义, 即

$$D = \frac{\sqrt{\sum_i n_a^2 (L_{ai} - L_a)^2 + n_b^2 (L_{bi} - L_b)^2 + n_c^2 (L_{ci} - L_c)^2}}{N(n_a L_a + n_b L_b + n_c L_c)}$$

为了简化讨论, 以下只考虑垂直入射的情况, 斜入射时的情况与垂直入射时类似. 1) PC1 各介质层厚度均为结构模型中的理想值, PC2 中介质 a 和介质 b 的层厚也为理想值, 仅介质 c 的层厚有偏离, 取  $L_{ci}$  ( $i=1, 2, \dots, 10$ ) 的值分别为 0.51 $\lambda_0$ , 0.79 $\lambda_0$ , 0.66 $\lambda_0$ , 0.64 $\lambda_0$ , 0.56 $\lambda_0$ , 0.66 $\lambda_0$ , 0.63 $\lambda_0$ , 0.59 $\lambda_0$ , 0.74 $\lambda_0$  和 0.75 $\lambda_0$ , 其平均值为  $L_c = 0.65\lambda_0$ , 此时计算得到无序度  $D = 2.4\%$ . 2) PC1 各介质层厚度都为理想值, PC2 中介质 b 层厚为理想值, 介质 a 和 c 的尺度都有偏离. 介质 c 层仍取  $D$  中的各分散值, 介质 a 各层厚度分别取 0.02 $\lambda_0$ , 0.08 $\lambda_0$ , 0.13 $\lambda_0$ , 0.12 $\lambda_0$ , 0.14 $\lambda_0$ , 0.11 $\lambda_0$ , 0.09 $\lambda_0$ , 0.1 $\lambda_0$ , 0.07 $\lambda_0$  和 0.14 $\lambda_0$ , 其平均值  $L_a = 0.1\lambda_0$ , 此时  $D = 3.7\%$ . 两种无序情况下计算得到的异质结构光子晶体透射谱如图 4, 与图 3 中理想情况下异质结构光子晶体正入射时的透射谱相比, 可以看出, 加入无序后, 三元异质结构光子晶体基本保持了理想情况下的光子禁带范围, 这可以大大减弱晶体实际制备对于膜厚精确度的要求.

现构造一个二元异质结构光子晶体, 二元光子晶体中两种介质的折射率分别为  $n_a = 1.6$ ,  $n_b = 3.6$ , 其结构参量参照文献 [16], 分别为  $L_{1a} = 0.8\lambda_0$ ,  $L_{1b} = 0.2\lambda_0$  和  $L_{2a} = 0.55\lambda_0$ ,  $L_{2b} = 0.45\lambda_0$ , 周期数仍为 10. 理想情况下二元异质结构的正入射透射光谱如图 5(a),

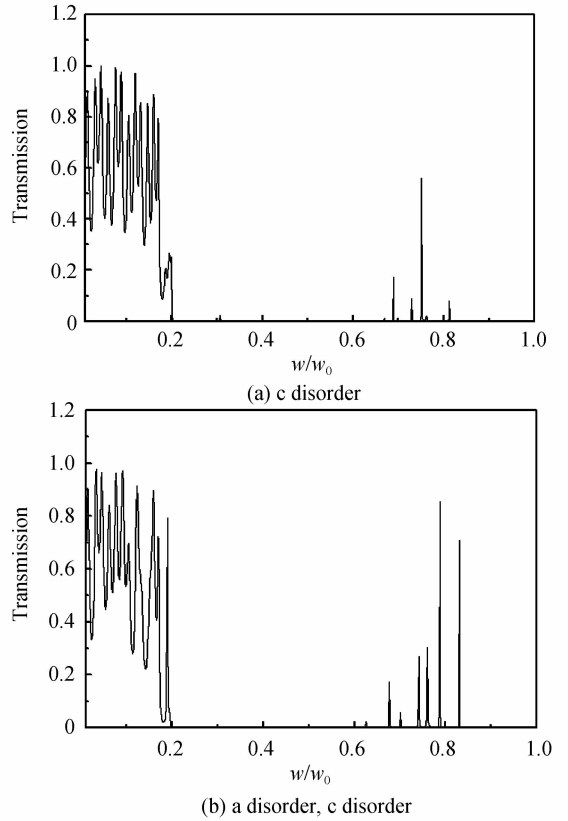


图 4 三元异质结构的透射光谱

Fig. 4 Band gap of ternary heterostructure with disorder

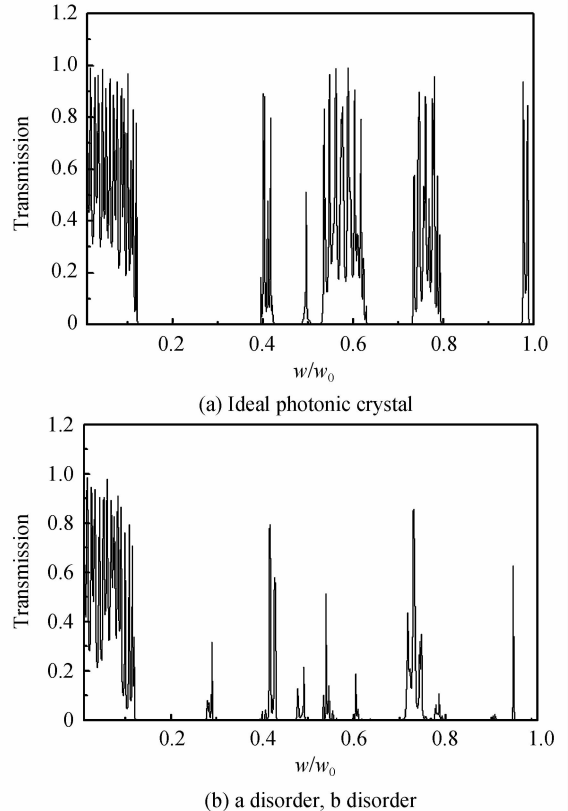


图 5 二元异质结构的透射光谱

Fig. 5 Band gap of two element photonic crystal  
与图 3 中三元异质结构正入射时的透射谱相比可以看

出,二元结构的禁带宽度要比三元结构的小.引入介质层厚度的随机起伏,假定PC1各介质层厚度为文献[16]中的理想值,PC2中a层厚度取值分别为 $0.7\lambda_0$ ,  $0.6\lambda_0$ ,  $0.7\lambda_0$ ,  $0.8\lambda_0$ ,  $1.0\lambda_0$ ,  $0.8\lambda_0$ ,  $0.6\lambda_0$ ,  $0.9\lambda_0$ ,  $0.9\lambda_0$ 和 $1.0\lambda_0$ ,b层取值分别为 $0.12\lambda_0$ ,  $0.12\lambda_0$ ,  $0.27\lambda_0$ ,  $0.29\lambda_0$ ,  $0.26\lambda_0$ ,  $0.14\lambda_0$ ,  $0.24\lambda_0$ ,  $0.16\lambda_0$ ,  $0.16\lambda_0$ ,  $0.24\lambda_0$ ,此时无序度 $D=3.1\%$ ,略小于三元结构中情况二时的无序度 $D=3.7\%$ .计算得到掺入无序后二元异质结构光子晶体透射谱如图5(b),比较5(a)、(b)两个光谱可以发现,二元异质结构PC1/PC2光子晶体的透射光谱发生了比较大的变化,加入无序后,异质结构禁带明显缩小,对照图4和图5可以得出,三元异质结构光子晶体的光子禁带范围受介质层厚度无序的影响比二元结构的要小很多,三元结构可以有效的减小各介质层厚度随机起伏引起的无序对光子带隙的影响,这对光子晶体的实际制备非常有利.

### 3 结论

利用两个具有合适能带结构的一维三元光子晶体组成光子晶体异质结,利用传输矩阵法模拟计算该结构的传输特性.计算结果表明,利用异质结构可以有效地扩大全方向反射的频率范围,得到在 $0.410\omega/\omega_0$ 到 $0.654\omega/\omega_0$ 频率范围内的全角度反射带,反射率高达99%.三元结构能够在一定程度上减小实际制作过程中各介质层厚度随机起伏引起的无序对光子带隙的影响.可以推论,把具有重叠禁带的多个一维光子晶体叠加起来会获得更宽频率范围的全角度反射带,而且通过调节参考波长,可以将光子禁带向长波或短波方向平移.研究结果对于微波天线反射面,太阳能电池背反射面,以及发光二极管出光面等光子晶体光学器件的制备具有理论指导意义.

#### 参考文献

[1] FINK Y, WINN J N, FAN S H, *et al.* A dielectric omnidirectional reflector[J]. *Science*, 1998, **282**(27): 1679-1682.  
 [2] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronic[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(20): 2059-2061.  
 [3] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(23): 2486-2489.  
 [4] WU X K, LIU S B, ZHANG H F, *et al.* Omnidirectional photonic band gap of one-dimensional ternary plasma photonic crystals[J]. *Journal of Optics*, 2011, **13**(3): 2158-2161.  
 [5] LUO Yan-hong, ZHAO Huan-yu, LI Gong-ping. Investigation of photonic band of two-dimensional photonic crystals based on lattice configurations[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1231001.  
 骆岩红,赵寰宇,李公平.基于晶格效应的光子晶体带隙特性研究[J].光子学报,2014,**43**(12): 1231001.

[6] SU An. Localized electric field of one-dimensional photonic crystal quantum well of double barrier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0216002.  
 苏安.双重势垒一维光子晶体量子阱内部局域电场分布[J].光子学报,2014,43(2): 0216002.  
 [7] GU Pei-fu, HUANG Bi-qin, ZHENG Zhen-rong. Thin-film photonic crystal omnidirectional reflector used in visible region[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(8): 3707-3710.  
 顾培夫,黄弼勤,郑臻荣.用于可见光区的薄膜光子晶体全角度反射器[J].物理学报,2005,**54**(8):3707-3710.  
 [8] GUAN H H, HAN P D, YANG Y Q, *et al.* Omnidirectional mirror for visible light based on one-dimensional photonic crystal[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(7): 071603.  
 [9] LIU Qi-neng, LIU Qin. Dispersion characteristics of total reflection tunnel in 1D photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(5): 611-614.  
 刘启能,刘沁.一维光子晶体全反射隧穿的色散特性[J].光子学报,2013,**42**(5): 611-614.  
 [10] CHEN Pen-zhuan, HOU Guo-fu, SU Song, *et al.* Simulation, design and fabrication of one-dimensional photonic crystal bank reflector for silicon thin film solar cell[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(12): 128801.  
 陈培专,侯国付,索松,等.硅基薄膜太阳能电池一维光子晶体背反射器的模拟设计与制备[J].物理学报,2014,**63**(12): 128801.  
 [11] WANG X, HU X H, LI Y Z, *et al.* Enlargement of omnidirectional total reflection frequency range in one-dimensional photonic crystals by using photonic heterostructures[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **80**(23): 4291-4293  
 [12] GUAN H H, HAN P D, LI Y P, *et al.* Optimization of dichromatic filters based on photonic heterostructures of Si/MgF<sub>2</sub>[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(10): 2656-2659.  
 [13] LI Xiang-xia, CHEN Zhi-hui, TIAN Dong-kang, *et al.* Investigation of one-dimensional photonic crystal reflection characteristics in visible and near-infrared regions[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2014, **31**(5): 498-503.  
 李祥霞,陈智辉,田东康,等.可见光至近红外一维光子晶体反射特性研究[J].深圳大学学报理工版,2014,**31**(5): 498-503.  
 [14] ZOU Ze-hua, LI Xiang-xia, TIAN Dong-kang, *et al.* Study on the character of wide angle reflector in the visible region based on one-dimensional photonic crystal[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2015, **46**(1): 110-113.  
 邹泽华,李祥霞,田东康,等.基于一维光子晶体的可见光波段大角度反射器研究[J].太原理工大学学报,2015,**46**(1): 110-113.  
 [15] ZI J, WANG J, ZHANG C. Large frequency range of negligible transmission in one-dimensional photonic quantum well structures[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, **73**(15): 2084-2086.  
 [16] XU X C, XI Y G, HAN D, *et al.* Effective plasma frequency in one-dimensional metallic-dielectric photonic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(28): 091112-091114.  
 [17] QIN Q, LU H, ZHU S N. Resonance transmission modes in dual-periodic dielectric multilayer films[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(26): 4654-4656.  
 [18] WANG X, HU X, LI Y Z, *et al.* Enlargement of omnidirectional total reflection frequency range in one-dimensional photonic crystals by using photonic heterostructures[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **8**(23): 42914-42916.