

doi:10.3788/gzxb20144310.1023001

级联一维光子晶体全方位反射器的带宽最大化

张娟

(上海大学 通信与信息工程学院 特种光纤与光接入网省部共建教育部重点实验室, 上海 200072)

摘 要: 理论研究了由级联一维光子晶体构成的光子异质结构的全方位透射(反射)特性. 其中各级联光子晶体的高低折射率介质相同、光学厚度比不同. 以两个光子晶体级联的结构为对象, 利用传输矩阵方法系统研究了不同偏振态光在不同入射角时光子带隙的变化, 得出实现全方位光子带隙的最大展宽条件, 即前一光子晶体的带隙上限要和后一光子晶体的带隙下限在最大入射角时重合. 分别给出了满足和不满足该最大展宽条件的级联结构的全方位带隙参量, 通过对全方位带隙宽度的比较说明了满足最大展宽条件的级联结构具有最大的全方位带隙宽度.

关键词: 一维光子晶体; 异质结构; 光子带隙; 全方位反射器; 扩展

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1023001-6

The Maximum Photonic Bandgap Extension of Omni-directional Reflectors Based on Cascaded One-dimensional Photonic Crystal

ZHANG Juan

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The omni-directional transmission (reflection) properties were theoretically investigated for photonic heterostructures composed of cascaded one-dimensional photonic crystals. Each photonic crystal in the structure has the same materials and different optical thickness ratios of the alternate high-and low-refractive index layers. Taking two photonic crystals cascaded structure as the object of study, the change of photonic bandgap with different polarization and incident angle was investigated through transfer matrix method, the condition of designing omnidirectional reflectors with the maximum photonic bandgap width was obtained, i. e., the upper bandgap edge of the former photonic crystal overlaps with the lower bandgap edge of the latter photonic crystal at the maximum incident angle. The parameters of the omnidirectional photonic bandgap were given for the cascaded structure with the condition satisfied and not satisfied. The widths of the omnidirectional photonic bandgap were compared. The results show that the cascaded structure with the condition satisfied has the maximum omnidirectional photonic bandgap width.

Key words: One-dimensional photonic crystal; Heterostructure; Photonic bandgap; Omni-directional reflector; Extension

OCIS Codes: 230.4170; 230.1480; 230.4040

0 引言

光子晶体(Photonic Crystal, PC)是一种在其内能控制电磁波传播的周期性介质材料^[1-2]. 频率位于光子晶体带隙(Photonic Bandgap, PBG)内的电磁波将被禁

止传播. 通过恰当地设计一些光子晶体将具有在任何入射角度对横电波和横磁波都禁止的全方位光子带隙(Omni-directional Photonic Bandgap, ODPBG)^[3], 具有这一特性的光子晶体被称为全方位反射器(Omni-directional Reflector, ODR). 全方位反射器应用广泛,

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10804070)、上海市科委重点项目(No. 11jc1413300)和上海市重点学科(No. S30108)资助

第一作者: 张娟(1976—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光通信无源器件、光信号处理、光子晶体、晶体光学等. Email: juanzhang@staff.shu.edu.cn

收稿日期: 2014-01-17; **录用日期:** 2014-04-22

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

是很多研究者关注的热点^[4-7].

一维光子晶体(One-dimensional Photonic Crystal, 1DPC)具有结构简单、可靠性高、易于集成等特点,是目前研究最广泛的一种光子晶体^[8-10].基于一维光子晶体的光方位反射器在理论和实验上已有较深入的研究^[11-19].Manzanares-Martinez等报道了一个具有较大全方位光子带隙宽度的 ODR,其通过组合具有相同填充率和折射率差但不同晶格周期的多个晶格来实现^[20].Kumar等研究了 $\text{air}/(\text{AB})_5/(\text{AC})_n/(\text{AB})_5/\text{SiO}_2$ 形式的级联结构^[21],通过增大 n 和选择适当的 AC 晶格周期来得到所需带隙宽度的 ODR.近期,Suthar等理论研究了一个大带隙宽度的 ODR,由具有不同高低折射率材料和不同高低折射率介质厚度比的三个 PC 组合而构成^[22].目前已有的研究都忽略了实现最大全方位带隙宽度的设计准则.Han等也只是指出在异质结构(级联结构)中产生 ODR 的条件^[23].

本文研究基于级联 1DPC 的异质结构,其中各级联 1DPC 的高低折射率材料相同,高低折射率介质层的厚度比不同.以两个 1DPC 级联的异质结构为对象,系统研究不同偏振态光在不同入射角时光子带隙的变化,提出了设计具有最大带隙宽度的 ODR 准则.此外,满足该 ODR 准则的各级联 PC 的全方位带隙彼此不相互重叠.利用该准则可对任意个 1DPC 级联的结构设计具有最大带隙宽度的 ODR.

1 理论和数值方法

图 1 为级联结构的示意图.该结构由 j 个 1DPC 级联构成,各 1DPC 的高低折射率介质层材料相同,厚度

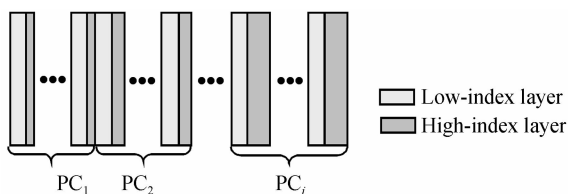
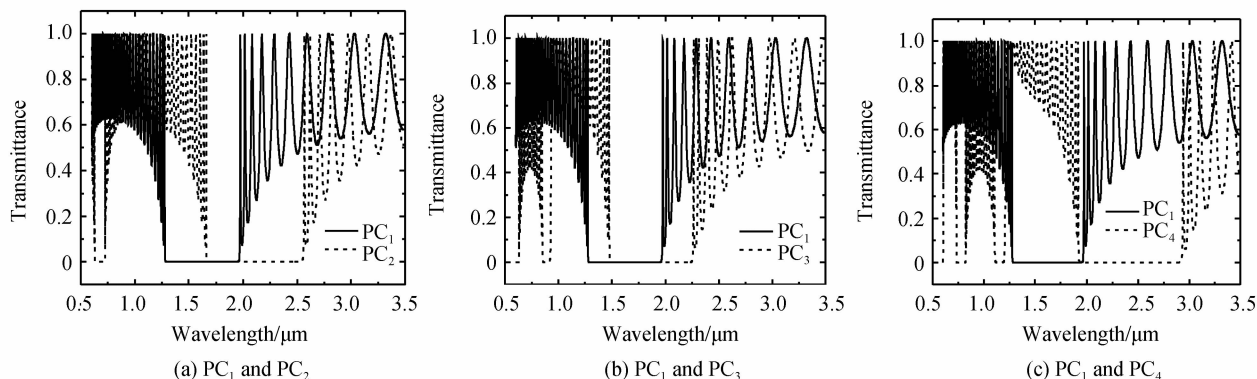


图 1 级联 1DPC 的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the heterostructure



(a) PC_1 and PC_2

(b) PC_1 and PC_3

(c) PC_1 and PC_4

比不同.

该结构的透射谱可通过传输矩阵方法来计算^[24].第 j 层介质的特征矩阵为

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{p_j} \cdot \sin \delta_j \\ -i \cdot p_j \cdot \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\delta_j = (2\pi/\lambda) n_j d_j \cos \theta_j$, $n_j d_j$ 为光学厚度, θ_j 为入射角, λ 为入射光波长. p_j 与光的偏振态有关,对 TE 偏振态的光来说 $p_j = n_j \cos \theta_j$;对 TM 偏振态的光来说 $p_j = n_j / \cos \theta_j$. N 层介质的特征矩阵可表示为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2 \cdots \mathbf{M}_N = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

整个结构的透射系数可表达为

$$t = \frac{2p_{in}}{(m_{11} + m_{12} \cdot p_{out}) \cdot p_{in} + (m_{21} + m_{22} \cdot p_{out})} \quad (3)$$

对于 TE 偏振态的光, $p_{in} = n_{in} \cos \theta_{in}$, $p_{out} = n_{out} \cos \theta_{out}$;对于 TM 偏振态的光, $p_{in} = n_{in} / \cos \theta_{in}$, $p_{out} = n_{out} / \cos \theta_{out}$.这里 n_{in} 和 n_{out} 分别为入射和出射环境的折射率. θ_{in} 和 θ_{out} 分别为入射和出射光线与介质层表面法线的夹角.

2 结果与讨论

2.1 正交入射

正入射时, TM 和 TE 偏振光的情况相同.选择高低折射率材料分别为 $\text{As}_{10}\text{Se}_{90}$ 和 SiO_2 , 其在 1 550 nm 波段的折射率分别为 2.388 2 和 1.45^[22].图 2 为正入射时不同 PC 及两个不同 PC 级联结构的透射谱. PC_1 高、低折射率介质的光学厚度均为 $\lambda_0/4$ (λ_0 为带隙的中心波长); PC_2 高折射率介质的光学厚度不变(即 $\lambda_0/4$), 而低折射率介质的光学厚度为其 1.3 倍(即 $1.3\lambda_0/4$); PC_3 低折射率介质的光学厚度不变(即 $\lambda_0/4$), 而高折射率介质的光学厚度为其 1.3 倍(即 $1.3\lambda_0/4$); PC_4 高、低折射率介质的光学厚度均为 $1.3\lambda_0/4$.图 2(a)~(c)分别为 PC_1 与 PC_2 、 PC_3 、 PC_4 的对比透射谱,图 2(d)~(f)分别为 PC_1 与 PC_2 、 PC_3 、 PC_4 的级联结构透射谱.假设所有介质是线性、各向同性及无吸收的.

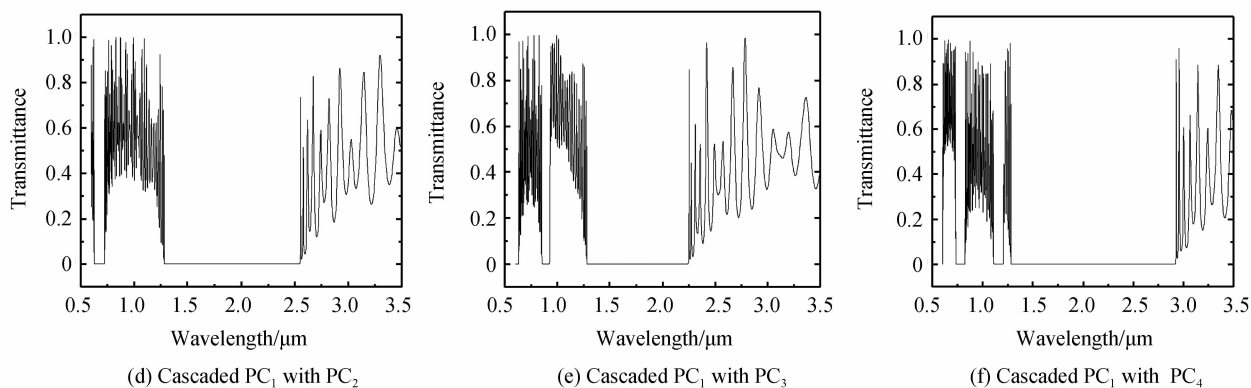


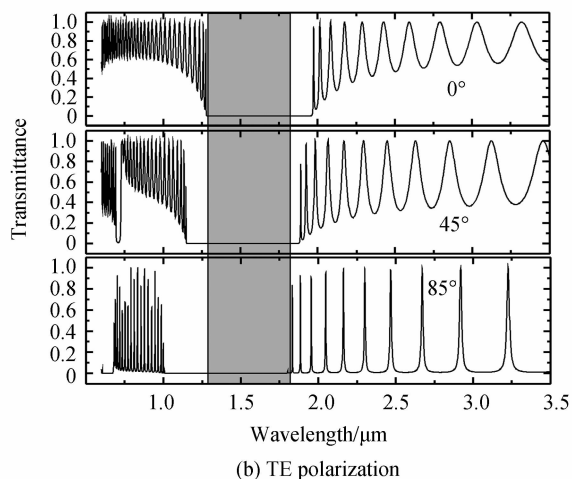
图 2 正入射时不同 PC 及两个不同 PC 级联结构的透射谱

Fig. 2 Transmittance spectra of different PC and two PC cascaded structure at normal incidence

由图 2 可知,材料不变时,1DPC 的带隙与高低折射率介质层的厚度有关.当低折射率介质层的厚度单独增大(如图 2(a)虚线)时,带隙向长波方向移动,且上波长限比下波长限变化更快,因而带隙宽度随介质层厚度的增加而增大.当高折射率介质层的厚度单独增大(如图 2(b)虚线)及高、低折射率介质层的厚度同时增大(如图 2(c)虚线)时,也具有同样的特性.当级联带隙彼此偏移两个 1DPC 时(如图 2(d)~(f)),级联结构的带隙相比级联的单个 1DPC 明显提高.级联 1DPC 的带隙下限为前一 PC 的带隙下限,级联 1DPC 的带隙上限为后一 PC 的带隙上限.对比图 2(d)~(f)还可知,厚度比变化相同时,高、低折射率介质厚度同时变化的级联结构带隙增大程度最大,高折射率介质厚度单独变化的级联结构带隙增大程度最小.

2.2 斜入射

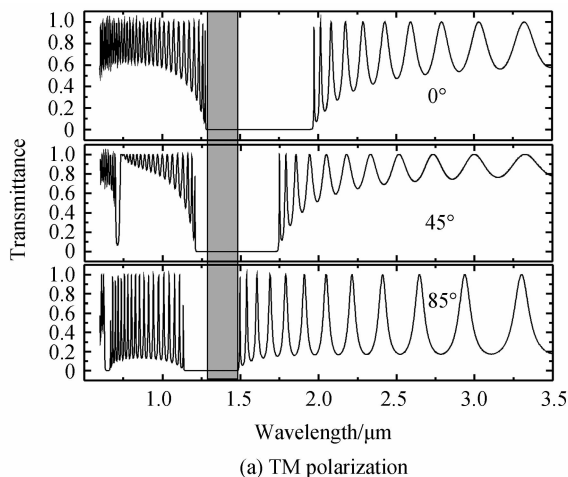
图 3(a)和(b)分别为不同入射角度时 PC_1 的 TM 和 TE 偏振光的透射谱.全方位的带隙范围在图中以灰色区域表示.由图 3 知,全方位带隙宽度由 0° 时的下波长限和 85° 时的上波长限决定.当入射角增大时,两种偏振光的带隙上下波长限均向短波方向偏移.对 TM 偏振光来说,上波长限随入射角变化更大;而对 TE 偏振光来说,下波长限随入射角变化更大.由于两

图 3 入射角为 0° , 45° 及 85° 时 PC_1 的透射谱Fig. 3 Transmittance spectra of PC_1 with incident angles of 0° , 45° and 85°

种偏振态光的透射谱在正交入射时相同,故 TM 偏振光的全方位带隙范围将位于 TE 偏振光的全方位带隙范围之内.该结论可从两个灰色区域的波长范围来观察到.因而 TM 偏振光的全方位带隙即为 TM 及 TE 偏振光的全方位带隙.此外, TM 偏振光的带隙宽度随入射角的增大而减小, TE 偏振光的带隙宽度随入射角的增大而增大.

若 PC_1 的高低折射率介质的光学厚度均为 $\lambda_0/4$, 后面级联的 PC_2 的低折射率介质的光学厚度也为 $\lambda_0/4$, 研究通过选择 PC_2 的高折射率介质的光学厚度来设计实现具有最大全方位带隙宽度的 ODR.

图 3 的结论对级联结构的 1DPC 仍然成立.即 PC_1/PC_2 的全方位带隙由 TM 偏振光在 0° 时的下波长限和 85° 时的上波长限决定.当级联结构在最大入射角具有最大光子带隙时将具有最大全方位光子带隙.显然,当 PC_1 的上波长限与 PC_2 的下波长限在最大入射角时重合, PC_1/PC_2 将具有最大的光子带隙.因此,设计具有最大全方位光子带隙的准则是 TM 偏振光在最大入射角时前一 PC 的上波长限与后一 PC 的下波长



限重合. 对 TM 偏振光, 假设前一 PC 在最大入射角度时的光子带隙为 $\lambda_a \sim \lambda_b$, 后一 PC 在最大入射角度时的光子带隙为 $\lambda_c \sim \lambda_d$, 则当 $\lambda_b = \lambda_c$ 时, 级联结构将具有最大的全方位光子带隙宽度.

图 4 为 20 对高低交替的折射率介质结构在 TM 偏振光最大角为 85° 时, 高低折射率介质的光学厚度比与带隙上波长限 λ_H 和带隙下波长限 λ_L 的变化关系. 图中实线上 A 点的波长值对应于 PC_1 的带隙上波长限. 虚线上的 B 点与 A 点具有相同的纵坐标, 所以 B 点的横坐标即为设计产生最大全方位带隙的 PC_2 的最优化光学厚度比, 可得该值为 1.427 43. 这里将该 PC_2 以 PC_{2opt} 表示.

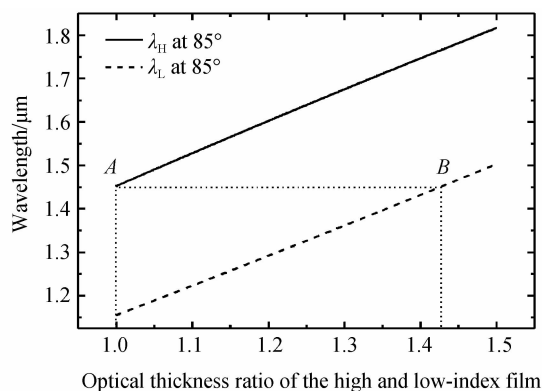


图 4 20 对高低交替的折射率介质结构在最大入射角 85° 时, 高、低折射率介质的光学厚度比与带隙上波长限 λ_H 和带隙下波长限 λ_L 的变化关系

Fig. 4 Upper bandgap edge λ_H and lower bandgap edge λ_L at the incident angle of 85° for a PC with 20 pairs of high- and low-refractive index material layers as a function of the optical thickness ratio of the high- and low-refractive index films

图 5 和 6 分别为 PC_{2opt} 和 PC_1/PC_{2opt} 随不同入射角度的透射谱. 正交入射时, TM、TE 两种偏振光具有相同的透射谱. PC_1 、 PC_{2opt} 和 PC_1/PC_{2opt} 的全方位带隙带隙参量如表 1. 可见通过级联, 全方位带隙宽度显著提

表 1 PC_1 、 PC_{2opt} 和 PC_1/PC_{2opt} 的全方位带隙带隙参量

Table 1 The parameters of ODPBG for PC_1 , PC_{2opt} and PC_1/PC_{2opt}

Structure	$\lambda_{LM}/\mu\text{m}$	$\lambda_{HM}/\mu\text{m}$	$\lambda_{LE}/\mu\text{m}$	$\lambda_{HE}/\mu\text{m}$	$\Delta\lambda/\mu\text{m}$	$\delta\lambda/\mu\text{m}$
PC_1	1.292 0	1.451 6	1.292 0	1.794 0	1.292 0-1.451 6	0.159 6
PC_{2opt}	1.586 5	1.766 4	1.586 5	2.184 2	1.586 5-1.766 4	0.179 9
PC_1/PC_{2opt}	1.290 6	1.776 5	1.290 6	2.229 2	1.290 6-1.776 5	0.486 0

λ_{LM} : lower wavelength limit of ODPBG for TM polarization; λ_{HM} : upper wavelength limit of ODPBG for TM polarization; λ_{LE} : lower wavelength limit of ODPBG for TE polarization; λ_{HE} : upper wavelength limit of ODPBG for TE polarization; $\Delta\lambda$: ODPBG range; $\delta\lambda$: ODPBG width;

若前一 PC 的全方位光子带隙与后一 PC 的全方位光子带隙有交叠, 则该级联结构的全方位光子带隙将不是最大. 这可以通过两个 PC 级联的结构来说明. 由于 PC 的全方位带隙由最小入射角时的带隙下限和最大入射角时的带隙上限决定, 当 PC_1 和 PC_2 的全方位光子带隙有交叠时, PC_1 在最大入射角时的上波长

高. 级联结构 PC_1/PC_{2opt} 具有比 PC_1 和 PC_{2opt} 大很多的全方位带隙宽度. 这里注意到 PC_1 和 PC_{2opt} 的全方位带隙无交叠.

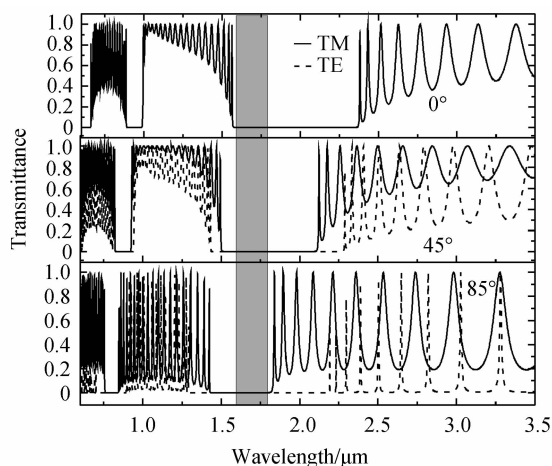


图 5 入射角 0° , 45° 和 85° 时 PC_{2opt} 的透射谱图
Fig. 5 Transmittance spectra of PC_{2opt} with incident angles of 0° , 45° and 85°

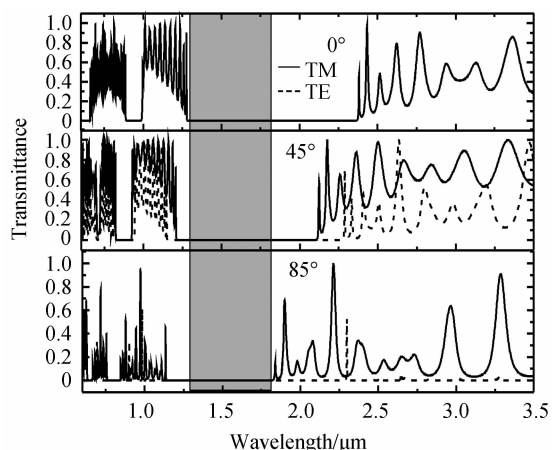
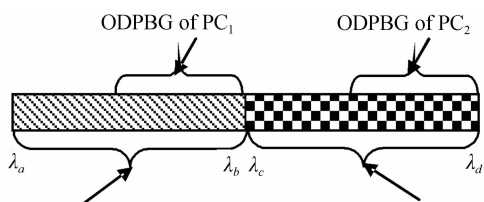


图 6 入射角 0° , 45° 和 85° 时 PC_1/PC_{2opt} 的透射谱图
Fig. 6 Transmittance spectra of PC_1/PC_{2opt} with incident angles of 0° , 45° and 85°

限将大于或等于 PC_2 在最小入射角时的下波长限. 另一方面, PC 的带隙随角度的增大向短波方向偏移, 则 PC_2 在最大入射角时的下波长限小于 PC_2 在最小入射角时的下波长限. 考虑到这两方面的情况, 显然 PC_2 在最大入射角时的下波长限将总是小于该最大入射角时 PC_1 的上波长限, 从而最大入射角时 PC_1/PC_2 的带隙

不是最大, PC_1/PC_2 的全方位禁带也就不是最大. 级联结构具有最大全方位带隙宽度时, 各 PC 的光子带隙及全方位光子带隙示意如图 7. 其中 λ_a 和 λ_b 分别为最大角度时 PC_1 光子带隙的下边界和上边界, λ_c 和 λ_d 分别为最大角度时 PC_2 光子带隙的下边界和上边界, 且 $\lambda_b = \lambda_c$.



PBG of PC_1 at 85° for TM wave PBG of PC_2 at 85° for TM wave

图 7 级联结构具有最大全方位带隙宽度时各 PC 的光子带隙及全方位光子带隙

Fig. 7 PBG and ODPBG of each PC when the cascaded structure has the maximum ODPBG width

将与 PC_1 的全方位光子带隙刚刚交叠的 PC 以 PC_{2ove} 表示. 图 8 和 9 分别为 PC_{2ove} 和 PC_1/PC_{2ove} 随不同入射角度的两偏振光的透射谱. 详细参量如表 2. 从表中可见 PC_1 的全方位光子带隙的上波长限等于 PC_{2ove} 的全方位光子带隙的下波长限, 此时 PC_1 和 PC_{2ove} 的全方位光子带隙刚刚发生交叠, 但级联结构的全方位光子带隙宽度 ($0.3627 \mu\text{m}$) 要小于表 1 时的情况 ($0.4860 \mu\text{m}$).

以上研究中 PC_1 高、低折射率介质的光学厚度比为 1, 固定 PC_2 低折射率介质的光学厚度与 PC_1 中的相同, 通过选择合适的高折射率介质的光学厚度来设计实现具有最大光子带隙宽度的 ODR. 除此之外, 还可以通过两种方式来实现: 1) 固定 PC_2 中高折射率介质的光学厚度与 PC_1 中的相同, 选择合适

表 2 PC_1 、 PC_{2ove} 和 PC_1/PC_{2ove} 的全方位带隙带隙参量

Table 2 The parameters of ODPBG for PC_1 , PC_{2ove} and PC_1/PC_{2ove}

Structure	$\lambda_{LM}/\mu\text{m}$	$\lambda_{HM}/\mu\text{m}$	$\lambda_{LE}/\mu\text{m}$	$\lambda_{HE}/\mu\text{m}$	$\Delta\lambda/\mu\text{m}$	$\delta\lambda/\mu\text{m}$
PC_1	1.2920	1.4516	1.2920	1.7940	1.2920-1.4516	0.1596
PC_{2ove}	1.4516	1.6300	1.4516	2.0145	1.4516-1.6300	0.1784
PC_1/PC_{2ove}	1.2906	1.6532	1.2906	2.0420	1.2906-1.6532	0.3627

介质的光学厚度, 如表 3(最优化结构以 PC_{2opt1} 表示); 2) PC_2 的高低折射率介质的光学厚度均不固定, 对其进行合适的选择, 如表 4(最优化结构以 PC_{2opt2} 表示). 由于全方位光子带隙的宽度由 TM 偏振光决定, 表 3 和 4 只详细给出该偏振态光的全方位光子带隙的相关参量.

本文设计准则很容易从能带理论的角度来理解. 按 Bloch 理论, 电磁波在周期介质中的传输矩阵满足 Bloch 波解, Bloch 波数 K 为实数对应于传输态, K 为虚数对应于光子禁带. 对于一个一维光子晶体, TE 和 TM 波在正入射时的禁带是重合的, 但随着入射角的增大, 光的禁带向高频方向漂移, 且 TE 波的禁带增大, TM 波的禁带减小. 设 ω_1 为 TM 波垂直入射时禁

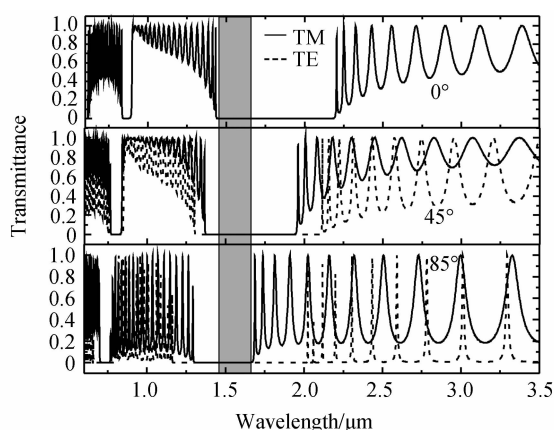


图 8 入射角 0° , 45° 和 85° 时 PC_{2ove} 的透射谱图

Fig. 8 Transmittance spectra of PC_{2ove} with incident angles of 0° , 45° and 85°

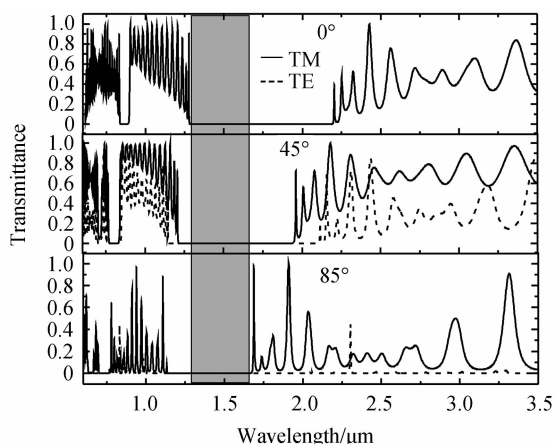


图 9 入射角 0° , 45° 和 85° 时 PC_1/PC_{2ove} 的透射谱图

Fig. 9 Transmittance spectra of PC_1/PC_{2ove} with incident angles of 0° , 45° and 85°

带的下边界, ω_2 为 TM 波掠入射时禁带的上边界, 当 $\omega_2 > \omega_1$ 时, 频率位于该带中的入射光可以实现全偏振全角度反射, 且该全方位禁带的宽度范围为 $\omega_1 \sim \omega_2$. 当利用级联方式增大全方位禁带的宽度时, 无需考虑其它角度, 只要使 TM 波在掠入射时(理论值为 90° , 实际

表 3 PC_1 、 PC_{2opt1} 和 PC_1/PC_{2opt1} 的全方位带隙带隙参量

Table 3 The parameters of ODPBG for PC_1 , PC_{2opt1} and PC_1/PC_{2opt1}

Structure	$\lambda_{LM}/\mu\text{m}$	$\lambda_{HM}/\mu\text{m}$	$\Delta\lambda/\mu\text{m}$	$\delta\lambda/\mu\text{m}$
PC_1	1.2920	1.4516	1.2920-1.4516	0.1596
PC_{2opt1}	1.6242	1.8259	1.6242-1.8259	0.2017
PC_1/PC_{2opt1}	1.2842	1.8579	1.2842-1.8579	0.5737

表 4 PC_1 、 PC_{2opt2} 和 PC_1/PC_{2opt2} 的全方位带隙带隙参量Table 4 The parameters of ODPBG for PC_1 , PC_{2opt2} and PC_1/PC_{2opt2}

Structure	$\lambda_{LM}/\mu\text{m}$	$\lambda_{HM}/\mu\text{m}$	$\Delta\lambda/\mu\text{m}$	$\delta\lambda/\mu\text{m}$
PC_1	1.2920	1.4516	1.2920-1.4516	0.1596
PC_{2opt2}	1.6068	1.8070	1.6068-1.8070	0.2002
PC_1/PC_{2opt2}	1.2847	1.8389	1.2847-1.8389	0.5542

设计时一般取 85°) 相级联的光子晶体间光子带隙正好衔接, 则级联光子晶体结构将具有最大的全方位光子带隙。

3 结论

本文研究了级联 1DPC 的全方位透射特性。各级联 1DPC 的高低交替折射率介质的材料相同, 光学厚度比不同。通过 1DPC 的级联可以展宽全方位光子带隙宽度。选择合适的高、低折射率介质的光学厚度比可实现全方位光子带隙宽度的最大展宽。对 TM 偏振光, 当处于最大入射角且前一 PC 的带隙上限与后一 PC 的带隙下限相等时, 级联结构具有最大的全方位光子带隙宽度。此时级联结构中各 PC 的全方位光子带隙不相交叠。按照该设计准则, 可以对任意个 PC 的级联结构设计实现全方位光子带隙的最大展宽。文中给出了两 PC 级联的不同结构的设计结果。ODRs 在集成光学、光纤通信、垂直腔表面发射激光及激光腔等都有许多潜在的应用。

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physics Review Letters*, 1987, **58**(20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physics Review Letters*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
- [3] KONG Xiang-kun, LIU Shao-bin, ZHANG Hai-feng, et al. Omnidirectional photonic band gap of one-dimensional ternary plasma photonic crystals[J]. *Journal of Optics*, 2011, **13**(3): 035101.
- [4] HART S D, MASKALY G R, TEMELKURAN B, et al. External reflection from omnidirectional dielectric mirror fibers [J]. *Science*, 2002, **296**(5567): 510-513.
- [5] NUSINSKY I, HARDY A A. Band-gap analysis of one-dimensional photonic crystals and conditions for gap closing [J]. *Physical Review B*, 2006, **73**(12): 125104.
- [6] FAN Chun-zhen, WANG Jun-qiao, HE Jin-na, et al. Theoretical study on the photonic band gap in one-dimensional photonic crystals with graded multilayer structure[J]. *Chinese Physics B*, 2013, **22**(7): 074211.
- [7] JIANG Li-yong, ZHENG Gai-ge, SHI Lin-xing, et al. Broad omnidirectional reflectors design using genetic algorithm[J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(19): 4882-4888.
- [8] ZHANG Juan, YU Shuai, GUO Sen, et al. Design of flat-top polarization filters based on one-dimensional photonic crystal theory [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(1): 0105005.
张娟, 于帅, 郭森, 等. 基于一维光子晶体理论的平顶偏振滤波器设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0105005.

- [9] GU Pei-yun, ZHANG Juan, ZHOU Yi. Design of multi-channel flat-top polarization filter based on anisotropic medium [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(6): 1043-1050.
顾佩芸, 张娟, 周益. 基于各向异性介质的多通道平顶偏振滤波器的设计[J]. *光电子 • 激光*, 2012, **23**(6): 1043-1050.
- [10] YU Shuai, ZHANG Juan. One-dimensional film-micro-cavity structure design for an asymmetrical interleaver filter[J]. *Optoelectronics Letters*, 2010, **6**(2): 85-88.
- [11] DEOPURA M, ULLAL C K, TEMELKURAN B, et al. Dielectric omnidirectional visible reflector[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(15): 1197-1199.
- [12] CHIGRIN D N, LAVRINENKO A V, YAROTSKY D A, et al. Observation of total omnidirectional reflection from a one-dimensional dielectric lattice[J]. *Applied Physics A*, 1999, **68**(1): 25-28.
- [13] JIANG Li-yong, ZHENG Gai-ge, SHI Lin-xing, et al. Broad omnidirectional reflectors design using genetic algorithm[J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(19): 4882-4888.
- [14] KAMINSKA K, ROBBIE K. Birefringent omnidirectional reflector[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(7): 1570-1576.
- [15] DAI Xiao-yu, XIANG Yuan-jiang, WEN Shuang-chun, et al. Thermally tunable and omnidirectional terahertz photonic bandgap in the one-dimensional photonic crystals containing semiconductor InSb[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **109**(5): 053104.
- [16] SRIVASTAVA S K, OJHA S P. Omnidirectional reflection bands in one-dimensional photonic crystal structure using fullerene films[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2007, **74**: 181-194.
- [17] SRIVASTAVA S K, OJHA S P. Enhancement of omnidirectional reflection bands in one-dimensional photonic crystals with left-handed materials [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2007, **68**: 91-111.
- [18] WU C J, CHUNG Y H, SYU B J, et al. Band gap extension in a one-dimensional ternary metal-dielectric photonic crystal [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2010, **102**: 81-93.
- [19] WANG Xin, HU Xin-hua, LI Yi-zhou, 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.
- [20] MANZANARES-MARTINE J, ARCHULETA-GARCIA R, CASTRO-GARAY P, et al. One-dimensional photonic heterostructure with broadband omnidirectional reflection[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, **111**: 105-117.
- [21] KUMAR V, KUMAR A, SINGH K H S, et al. Broadening of omnidirectional reflection range by cascade 1D photonic crystal, Optoelectronics and advanced material-rapid communication[J]. *Optoelectronics and Advanced Materials*, 2011, **5**(5): 488-490.
- [22] SUTHAR B, BHARGAVA A. Enlargement of omnidirectional reflection by cascading chalcogenide based photonic crystals[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(6): 1481-1485.
- [23] HAN Peng, WANG He-zhou. Criterion of omnidirectional reflection in a one-dimensional photonic heterostructure[J]. *Journal of Optical Society of America B*, 2005, **22**(7): 1571-1575.
- [24] BORN M, WOLF E. Principles of optics[M]. 7th (expanded) ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.