

具有禁带展宽特性的一维光子晶体*

王利^{1,2} 王占山¹ 吴永刚¹ 王少伟³ 陈玲燕¹

(1 同济大学精密光学工程技术研究所,物理系,上海 200092)

(2 聊城大学教育技术系,聊城,山东 252059)

(3 中国科学院上海技术物理研究所,红外物理国家重点实验室,上海 200093)

摘要 提出了介质的光学厚度系数成圆形分布的一维光子晶体结构,与周期结构的光子晶体相比,该结构具有禁带展宽特性.同时讨论了起止膜层及膜层的光学厚度对该结构禁带特性的影响,优化出了在所选材料的介电常数所允许的频率范围内,具有完全禁带特征的光子晶体结构.

关键词 光子晶体;宽禁带;光学厚度系数;圆形分布

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

从 Yablonovitch 和 John 分别在 1987 年提出光子晶体概念以来^[1,2],人们对光子晶体进行了深入的研究.它是具有光子频率禁带的特殊材料,落在禁带中的光被禁止传播.利用光子晶体的这一特性,人们可以控制光子的运动,导致许多奇特物理效应.相对而言,由于一维光子晶体带隙材料制备的简单性,人们还是希望通过一维光子晶体的制备获得所需要的带隙特征.在对一维光子晶体的研究过程中,人们希望得到具有宽禁带特性的一维光子晶体.为了获得更宽的禁带,人们对各种结构及材料的选择进行了大量的尝试^[3-6],取得了明显的效果;其中两端具有缓变结构的光子晶体的禁带为 500 ~ 3500 nm^[6],探索具有宽禁带特性的光子晶体结构,是人们不断追求的目标.

William H. Southwell^[3]用小波变换的方法得到了具有宽截止带的反射镜.在设计中将材料的光学常数看作变量,满足一定的方程,在设计中得到了相当理想的结果,但在这种结构中每层材料的光学常数都不同,因而实际制备较困难.为了得到既有理想的禁带光学特性又容易制备的结构,我们将容易控制的膜层光学厚度系数作为变量,提出并研究了膜层的光学厚度系数成圆形分布的一维介质结构,计算结果表明:该结构与周期结构的一维光子晶体相比,能有效的展宽禁带,经过对该结构进行优化之后,得到了所选材没有吸收且色散不发生变化的频率范围内全为禁带的一维结构.

1 结构模型

计算模型为膜层光学厚度系数 A 与膜层序数 k 满足圆方程的一维光子晶体结构.模型如图 1(a)所示,它表示 29 层没有优化过的膜层光学厚度系数 A 的分布.交替排布的两种材料的磁导率 $\mu = 1$,介电常数分别为 $\epsilon_H = 16.81, \epsilon_L = 1.8225$.假设光子晶体放在空气中,介电常数为 1;在计算中将分别具有高低介电常数的介质为一复合介质对,并记作

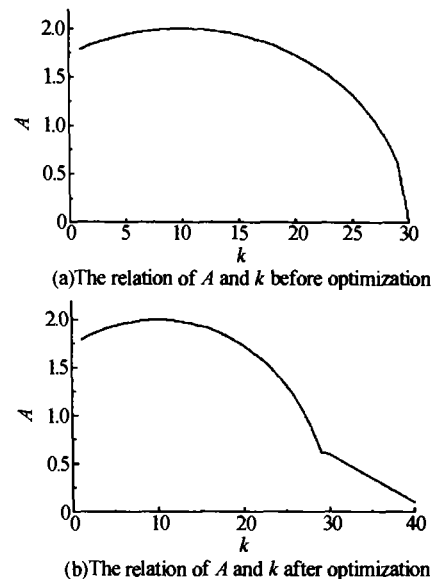


图1 光学厚度系数 A 与膜层序数 k 的关系
Fig. 1 The distribution of the index of optic thickness vs the layer's ordinal number

$A(1H, 1L), A(1H, 1L)$ 作为该模型中的一层.其中, $1H = 1L = n_H d_H = n_L d_L = \lambda_0 / 4$ 为膜层的光学厚; n_H, d_H, n_L, d_L 分别为高低折射率材料的折射率和物理厚度; λ_0 为设计波长; A 为光学厚度系数. k 与膜层光学厚度系数 A 的关系满足 ($k = 1, 2, 3$ 正整数)

$$(0.1 \times k - 1)^2 + A^2 = 4 \quad (1)$$

我们利用传输矩阵方法^[7]对该结构进行了研究.对于每一层介质的特征矩阵可表示为^[8]

*国家重点基础研究发展规划(973)资助(课题号: 2001CB610407)
Tel: 021-65984652 Email: wangzs@mail.tongji.edu.cn
收稿日期: 2003-03-18

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & j \sin \delta_i / \eta_i \\ j \eta_i \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于 k 层一维介质的传输矩阵 M 可表示为

$$M = \prod_{i=1}^k M_i \quad (3)$$

对于光由左向右入射的情况,可得到电场之间的关系

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_{k+1} \\ H_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{k+1} \\ H_{k+1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

透射系数和反射系数分别为^[7]

$$r = \frac{m_{11} \eta_0 + m_{12} \eta_0 \eta_{k+1} - m_{21} - m_{22} \eta_{k+1}}{m_{11} \eta_0 + m_{12} \eta_0 \eta_{k+1} + m_{21} + m_{22} \eta_{k+1}} \quad (5)$$

$$t = \frac{2 \eta_0}{m_{11} \eta_0 + m_{12} \eta_0 \eta_{k+1} + m_{21} + m_{22} \eta_{k+1}} \quad (6)$$

式中, η_0 、 η_{k+1} 分别为入射介质和出射介质的导纳, 透射率 $R = |r|^2$.

2 计算及分析

对图 1(a) 所示的结构进行计算, 其中膜层序数 k 的取值从 1 到 30, 光学厚度系数 A 与膜层序数 k 的关系满足式(1), $1H = 1L = \lambda_0/4$, $\lambda_0 = 2000$ nm, 在正入射的条件下, (文中计算的带隙计算都是在正入射条件下得到的) 得到如图 2(a) 所示的禁带特性, 该结构的禁带在低于 1500 nm 范围内还不够平坦, 振荡较大, 在 2000 ~ 5000 nm 的范围内禁带平坦, 表现出了较宽的禁带特性.

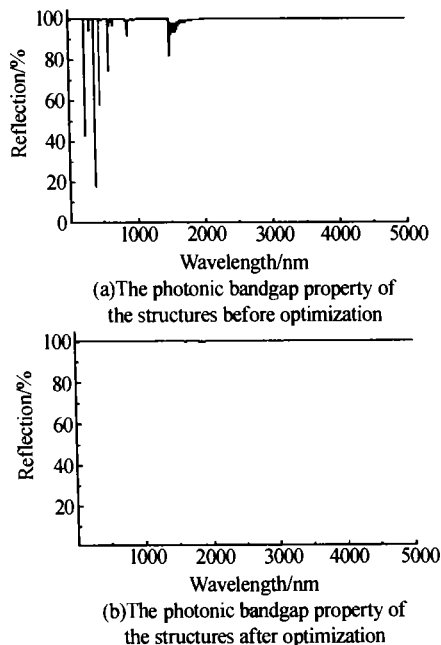


图 2 对结构优化前和优化后的禁带宽度
Fig. 2 The photonic bandgap properties of the structures before and after optimization

为了优化该结构的禁带特性, 对不同的膜层光学厚度和不同的起止膜层进行了数值计算. 通过改变膜层的光学厚度, 即改变设计波长 λ_0 改变膜层的物理厚度, 起止膜层分别为 $k = 1, k = 30$ 时所对应的

$A = 1.78606, A = 0.6245$, 即 (1.78606H 1.78606L) 和 (0.6245H 0.6245L). 当设计波长 ($\lambda_0 = 1000$ nm) 时, 得到如图 3(a) 所示的禁带特性; 当 $\lambda_0 = 400$ nm 时, 得到如图 3(b) 所示的禁带特性曲线. 由图 3 可以看出, 随着两种膜层光学厚度的降低, 禁带位置逐渐向短波方向移动, 且长波方向的振荡起伏增加; 短波方向的禁带起伏特性基本不发生变化.

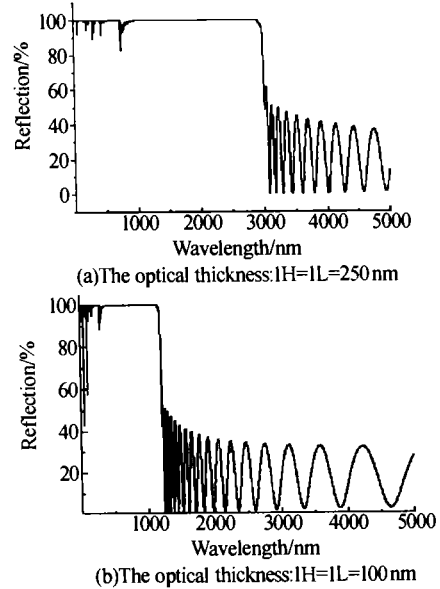


图 3 膜层光学厚度对禁带特性的影响
Fig. 3 The influence of the optical thickness to the property of photonic bandgaps

我们取光学厚度 $1H = 1L = n_H d_H = n_L d_L = \lambda_0/4$, $\lambda_0 = 2000$ nm.

改变起始膜层, 终止膜层不变, 当起始膜层的光学厚度系数取 1.73205, 即去掉这之前的膜层, 从第 20 层开始. 其禁带开始发生明显改变, 如图 4(a) 所示, 短波方向有剧烈振荡; 长波方向也开始有起伏.

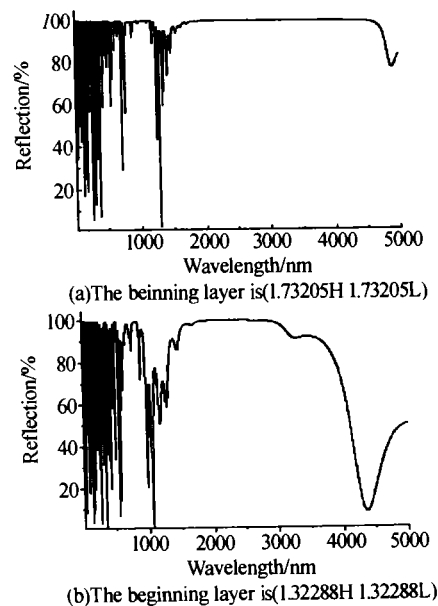


图 4 起始膜层对禁带特性的影响
Fig. 4 The influence of the beginning layer to the photonic bandgap's properties

当起始膜层的光学厚度系数大于 1.73205 时,该结构的禁带特性不发生明显变化. 当起始膜层的光学厚度系数取 1.32288 时,即从第 25 层开始,禁带特性曲线如图 4(b)所示. 由图 4 可以看出,若依次减小起始膜层的光学厚度系数,在长波和短波方向都会有振荡出现,但对长波方向的影响比短波方向的影响大,禁带宽度变窄.

起始膜层从第一层开始,只改变终止膜层的光学厚度系数,当终止膜层的光学厚度系数取 1.2 时,禁带特性曲线如图 5(a)所示;当终止膜层的光学厚度系数取 1.6 时,禁带特性曲线如图 5(b)所示. 由图 5 可以看出终止膜层的厚度系数会影响短波方向的平坦度,而对长波方向的影响不明显.

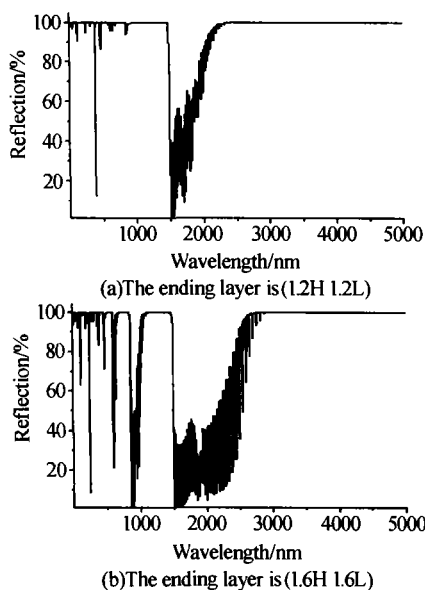


图 5 终止膜层对禁带特性的影响

Fig. 5 The influence of the ending layer to the photonic bandgap's properties

由于所选材料不可能在整个波段内没有色散和吸收,该模型是一个理想的结构,说明了具有不同厚度的单元按照一定规律排列也可以产生宽的禁带. 由图 3、图 4 和图 5 可以看出膜层的光学厚度及起止膜层对于禁带的宽度、位置都有影响,在具体确定所需要的禁带宽度后,根据以上计算分析,选取适当膜层光学厚度、起止膜层,减小总的膜层数和总的物理厚度,使所确定的结构在满足光学特性要求的同时,又利于实际的结构制备.

该模型为非周期结构,在实际制备过程中膜厚监控用晶振法,由于晶振在膜厚监控中的控制误差一般为 4%^[9]. 为了探讨该结构实现的可能性,我们对该结构进行了容许误差分析. 在模拟计算中误差取 4%,分析结果表明在该随机误差范围内,该结构具有较好的禁带重复特性.

3 带隙的优化

当膜层的光学厚度系数只满足方程(1)时,所对应结构的禁带形状还不十分理想,主要是短波方向有振荡,不能满足实际应用. 由以上计算可以看出影响短波方向禁带特性的因素主要是终止膜层,为了得到更好的结果,需要在原来模型结构后面增加新的结构.

在光子晶体两端添加缓慢变化结构,能使禁带同时向短波和长波方向扩展^[6]. 为了得到比图 1(a)所对应结构更为理想的禁带特性曲线,我们在图 1(a)结构的膜层后面再增加光学厚度系数为等差数列,公差为 0.05,光学厚度系数由 0.6 减小到 0.1 的介质膜系,其总的光学厚度系数分布如图 1(b)所示. 得到了如图 2(b)所示的禁带特性,与图 2(a)比较可以看出,所增加的结构主要对原来禁带在短波方向起到了修饰作用,而对长波方向的禁带特性没有改变,从而得到了在所选材料的色散特性允许的频率范围内基本为完全禁带的理想模型曲线. 在实际的设计应用中可以根据需要确定修饰膜系取舍.

4 结论

我们对膜层的光学厚度系数成圆形分布的一维光子晶体的禁带特性进行了理论计算和分析. 计算结果表明,终止膜层主要影响短波方向的禁带形状,起始膜层、膜层的光学厚度主要影响长波方向的禁带形状;理论上优化出了在所选材料的色散特性所允许的频率范围内,具有完全禁带的理想结构模型. 该结构的一维光子晶体在制作高反镜、多通道滤波器器件及镀制波分复用器件等领域有潜在的应用价值.

参考文献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059 ~ 2061
- 2 John S. Strong localization of photonics in certain disordered dielectric superlattices. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23): 2486 ~ 2489
- 3 William H. Southwell. Extended-bandwidth reflector designs by using wavelets. *Applied Optics*, 1997, **36**(1): 314 ~ 318
- 4 Li Hongqiang, Gu Guochang, Chen Hong. Disordered dielectric high reflectors with broadband from visible to infrared. *Appl Phys Lett*, 1999, **74**(22): 3260 ~ 3262
- 5 Zhang Chun, Qiao Feng, Wan Jun. Enlargement of nontransmission frequency range in photonic crystals by

- using multiple heterostructures. *J Appl Phys*, 2000, **87**(6): 3174 ~ 3176
- 6 欧阳征标, 朱骏, 李景镇. 两端有慢变结构的光子晶体的能带特性研究. *光学学报*, 2002, **22**(5): 612 ~ 615
Aouyang Zhengbiao, Zhu J, Li J Z. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 612 ~ 615
- 7 王辉, 李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构. *物理学报*, 2001, **50**(11): 2172 ~ 2178
Wang H, Li Y P. *Acta Physica Sinica*, 2001, **87**(6): 3174 ~ 3176
- 8 阎吉祥, 魏光辉. 矩阵光学. 北京: 兵器工业出版社, 1995. 210 ~ 235
Yan J X, Wei G H. *Matrix Optics*. Beijing: Enginery and Industry Publishing Company, 1995. 210 ~ 235
- 9 Willey R R. *Practical design and production of optical thin films*. New York Basel Hong Kong: Marcel Dekker, Inc. . 2002, 2nd, 220 ~ 225

A One-dimensional Photonic Crystal Structure with a Large Absolute Band Gap

Wang Li^{1,2}, Wang Zhanshan¹, Wu Yonggang¹, Wang Shaowei³, Cheng Lingyan¹

¹ Institute of Precision Optical Engineering, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092

² Department of Educational Technology, Liaocheng University, Shandong 252059

³ National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200093

Received date: 2003-03-18

Abstract A photonic crystal structure with optical thickness' distribution according to a circular function is presented. This structure displays a wide band-gap. The influences of the beginning, ending layers and the optical thickness to the photonic crystal bandgaps are discussed. Optimization of a broad band reflector is also suggested.

Keywords Photonic crystal; Wide band gap; Optical thickness coefficient; Circular distribution

Wang Li was born on January 26, 1975, in Shandong Province, China. He received the B. S. degree in 1998, from Liaocheng University, China. He is presently pursuing the M. S. degree in optics at Tongji University. He is interested in optical coating and one dimensional photonic crystal designing and fabrication.

