

文章编号:1001-5078(2008)10-1015-04

· 光电材料与器件 ·

对称型正负交替一维光子晶体超窄带滤波器

罗仁华, 梁瑞生, 韦中超, 杨 广, 刘颂豪

(华南师范大学信息光电子科技学院 光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要:构造了 $(AB)^{N_1}(BA)^{N_2}$ 对称型正负折射率交替一维光子晶体, 并利用传输矩阵法进行数值模拟, 研究了这种正负折射率交替一维光子晶体的能带结构与各参数之间的关系。结果表明: 当两种材料的光学厚度相同时, 该结构光子晶体比传统的光子晶体的带隙大得多, 且在主禁带内有极窄的透射带。并利用此透射带, 设计了一种在红外波段 1550nm 窗口 3dB 带宽可以做到 0.000001nm 以下, 窗口内透过率接近 100% 的超窄带滤波器。该结构的光子晶体可以用作超窄带滤波器, 有望在光通信超密集波分复用系统中获得广泛应用。

关键词:光子晶体; 传输矩阵; 对称结构; 正负折射率交替; 超窄带滤波

中图分类号: O431

文献标识码: A

Symmetrical Structural One-dimensional Photonic Crystal Super Narrow-band Filter With Positive-negative Index Alternant Multilayer

LUO Ren-hua, LIANG Rui-sheng, WEI Zhong-chao, YANG Guang, LIU Song-hao

(Laboratory of Photonic Information Technology, School for Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Constructing the Symmetrical Structural One-dimensional Photonic Crystal in the form of $(AB)^{N_1}(BA)^{N_2}$. By using the transfer matrix method, the relations between the optical properties of this one-dimensional photonic band-gap structure with positive-negative index alternant multilayer and its parameters are analyzed. The results show that the photonic crystals with positive-negative index alternant multilayer have wider photonic band-gap which is different from the case of traditional photonic crystals with narrow transmission bands when the two layers have the same optical thickness. There are extremely narrow transmission peaks in the main photonic band-gap. Numerical investigation shows that the structure investigated can be served as a super narrow pass band optical filter. The 3dB pass band obtained can be less than 0.000001nm near the infrared 1550nm, and the optical transmission in the pass band is almost 100%. This kind of photonic crystal super narrow band optical filter may find applications in super dense wavelength division multiplexing (SDWDM) for optical communication system.

Key words: photonic crystal; the transfer matrix method; symmetrical structure; positive-negative index alternant multilayer; super narrow-band filter

1 引言

近年来,光子晶体的研究非常活跃,光子晶体最显著的特点就是其内部具有光子禁带,处于禁带内的光子是不能传播的,这一特性使得光子晶体在光电子和光通信中有重要的应用价值^[1]。

负折射材料,又称左手材料。在其中波矢方向

基金项目:国家“973”计划项目(No. 2007CB307001)资助。
作者简介:罗仁华(1983-),男,硕士研究生,研究方向为纳/微结构与纳/微器件中的光子特性。E-mail: roen128@126.com
收稿日期:2008-04-02;修订日期:2008-05-27

与能流方向相反,这样引起相位随光波的传播而减小。负折射材料的奇异特性弥补了很多传统材料的不足,如产生反向多普勒(Doppler)频移和逆切伦科夫(Cerenkov)效应等^[2-3]。近来对传统正折射率材料交替的光子晶体研究很多^[4-7],本文研究了一种正负折射率材料交替对称结构的光子晶体,利用光学传输矩阵法^[8]对这种结构进行了数值模拟。分析了各参数对其透射谱的影响,发现主禁带内存在极窄的透射峰,并利用这种透射峰设计了一种用于红外通信波段1550 μm 的超窄带滤波器,其3dB带宽可以做到0.000001nm以下,通带内光透过率可达100%,禁带内光透过率接近于零。

2 物理模型与理论基础

2.1 物理模型

本文研究的结构如图1所示,将折射率为 n_1 ($n_1 > 0$)、厚度为 a 的正折射率介质层A与折射率为 n_2 ($n_2 < 0$)、厚度为 b 的负折射率介质层B交替排列,组成 $(AB)^{N_1}(BA)^{N_2}$ 型的对称结构(N_1 为AB排列的复周期数, N_2 为BA排列的复周期数),其中 $d = a + b$ 。根据光子晶体的理论,这种对称结构的光子晶体具有与传统正负交替光子晶体不同的光学特性,本文全面分析了此结构光子晶体的光学特性。

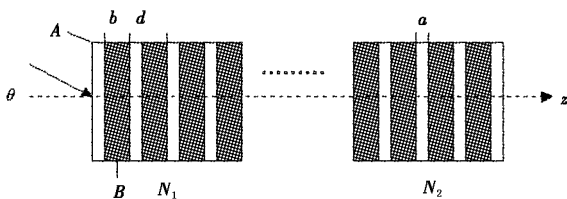


图1 对称结构正负交替一维光子晶体模型

2.2 传输矩阵法

本文使用的理论方法是光学传输矩阵法^[8]。在均匀介质膜的内部,介电常数 ϵ 、磁导率 μ 和折射率 n (当 $\epsilon > 0$ 且 $\mu > 0$, $n = \sqrt{\epsilon\mu}$;当 $\epsilon < 0$ 且 $\mu < 0$, $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$)都是常数。如果以 θ 代表波入射方向和介质表面法线的夹角,对于TE波,可以写出其特性矩阵为:

$$M(z) = \begin{bmatrix} \cos(k_0 n z \cos\theta) & -\frac{i}{p} \sin(k_0 n z \cos\theta) \\ -i p \sin(k_0 n z \cos\theta) & \cos(k_0 n z \cos\theta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $p = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cos\theta$ 。进而可写出多层媒质的特性矩阵为:

$$M(z_N) = M_1(z_1) M_2(z_2 - z_1) \cdots M_N(z_N - z_{N-1}) \\ = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

设 ϵ_1, μ_1 和 ϵ_l, μ_l 分别为第一个媒质和最后一个媒质的介电常数和磁导率, θ_f, θ_l 分别为入射波和透射波方向与介质表面法线方向(分层层方向)的夹角,则进一步可以写出整个结构的反射系数和透射系数为:

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12} p_l) p_f - (m_{21} + m_{22} p_l)}{(m_{11} + m_{12} p_l) p_f + (m_{21} + m_{22} p_l)} \\ t = \frac{2 p_f}{(m_{11} + m_{12} p_l) p_f + (m_{21} + m_{22} p_l)} \quad (3)$$

其中, $p_f = \sqrt{\frac{\epsilon_f}{\mu_f}} \cos\theta_f, p_l = \sqrt{\frac{\epsilon_l}{\mu_l}} \cos\theta_l$ 。则反射率和透射率可以写出为:

$$R = |r|^2, T = \frac{p_l}{p_f} |t|^2 = 1 - R \quad (4)$$

3 数值研究结果与分析

假设介质都是非磁性的($\mu_1 = 1, \mu_2 = -1$),且入射光都是垂直于光子晶体表面入射($\theta = 0$)。各介质都是各向同性的,且两边都是空气,即 $\epsilon_f = \epsilon_l = 1, \mu_f = \mu_l = 1$;入射光波长落在红外通信波段($\lambda_0 = 1550\text{nm}$)附近。其中正折射率介质为钛钡玻璃,其折射率为 $n_1 = 1.90$,负折射率介质折射率取为 $n_2 = -2.4$,取 $a n_1 = -b n_2 = \lambda_0$ 。

文献[3]讨论了正负折射率交替一维光子晶体的光学性质,表明这种光子晶体具有宽而平坦的禁带,且在法布里-珀罗(F-P)谐振波长处有窄而尖锐的通带。本文提出的 $(AB)^{N_1}(BA)^{N_2}$ 正负折射率交替对称结构,其透射谱如图2所示(横坐标为相对频率 ω/ω_0 ,纵坐标为透过率),其中 $N_1 = N_2 = N = 20$ 。发现这种对称结构的光子晶体透射谱中主禁带内存在极窄的透射峰,与在这种正负交替结构光子晶体中引入一定尺寸范围的缺陷层有相似的效果,且这种对称结构光子晶体主禁带内的透射峰与正负

折射率交替光子晶体中的透射峰带宽相比窄 1~2 个数量级。

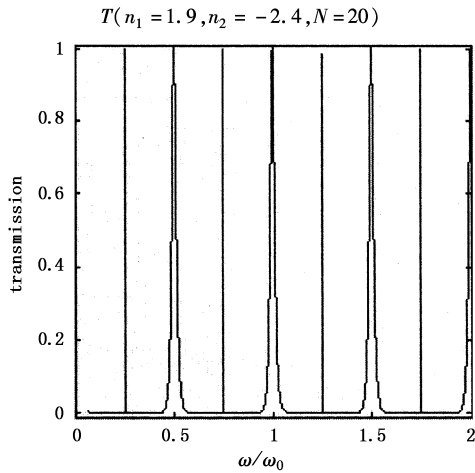


图2 (AB)^{N₁}(BA)^{N₂}型(N₁ = N₂ = N)正负折射率交替对称结构一维光子晶体透射谱

3.1 n₁ 对带隙特性的影响分析

分析中若无特殊说明,其参数同上。

当固定 $n_2 = -2.4$, 使 n_1 从 1.0 逐渐增大到 2.4, 通过计算分析其带隙特性如图 3 所示。在 n_1 从 1.0 到 2.4 的过程中, F-P 谐振波长处透射峰的宽度依次增加, 而位置恒定不变; 光子禁带的宽度依次减小, 到 $n_1 = 2.2$ 左右处光子禁带消失, 到 $n_1 = 2.3$ 处为全透过程; 在 $n_1 = 1.7$ 左右处主禁带内出现透射峰, 从 1.7~2.4 过程中, 主禁带内的透射峰的透过率依次增加, 其宽度依次增加, 在 $n_1 = 1.85$ 处出现透过率与带宽的最佳值。

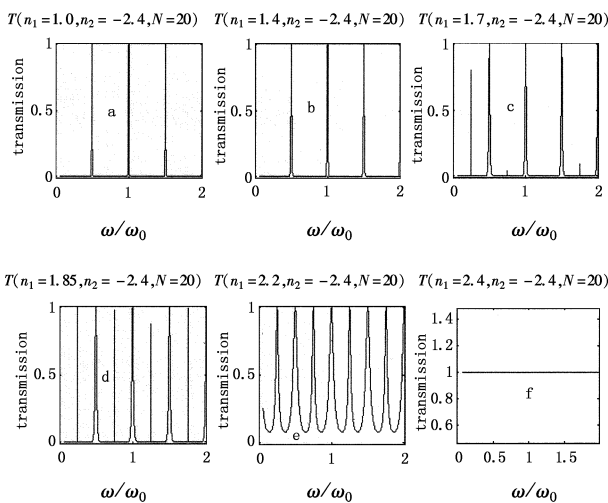


图3 (AB)^{N₁}(BA)^{N₂}(N₁ = N₂ = N)型对称结构一维光子晶体透射谱随 n₁ 的变化情况

3.2 n₂ 对带隙特性的影响分析

分析中若无特殊说明,其参数同上。

当固定 $n_1 = 1.9$, 使 n_2 逐渐从 -2.4 增大到 -1.0, 通过计算分析其带隙特性如图 4 所示。在 n_2 从 -2.4 到 -1.9 的过程中, 光子禁带宽度依次变窄最后消失, F-P 谐振波长处透射峰宽度增大, 且位置不变, 在 $n_2 = -1.9$ 时为全透型。在 n_2 从 -1.9 到 -1.0 的过程中, 在 $n_2 = -1.7$ 左右光子禁带出现, 同时主禁带内出现窄的透射峰, 之后光子禁带宽度依次变宽, 在 $n_2 = -1.4$ 左右主禁带内的透射峰消失, F-P 谐振波长处透射峰宽度依次变窄, 且位置恒定。

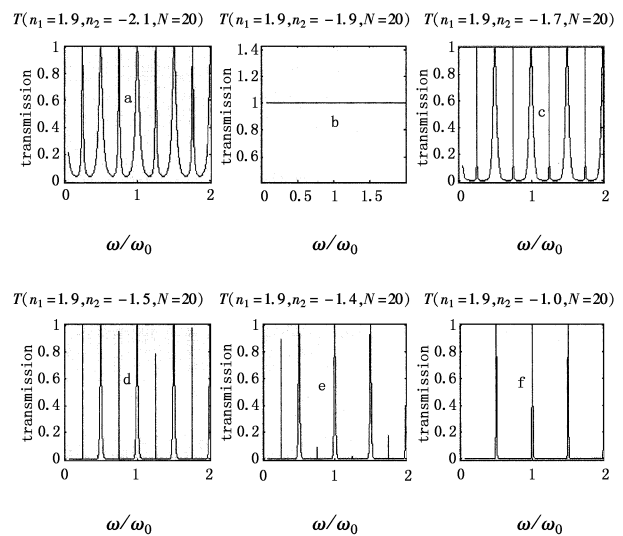


图4 (AB)^{N₁}(BA)^{N₂}(N₁ = N₂ = N)型对称结构一维光子晶体透射谱随 n₂ 的变化情况

与此同时, 本文还通过大量计算模拟了 N 对带隙特性的影响, 在 $N = 5 \sim 10$ 处未形成光子禁带; 在 15~25 过程中, 主禁带内会都出现窄的透射峰, 当 N 从 5~20, 主禁带内的透射峰越来越窄; 当 N 大于 20, 主禁带内的透射峰消失。而对于 F-P 谐振波长处的透射峰, 其宽度越来越窄, 可解释为: 对这种结构本质来说是引入了缺陷, 当两边的重复周期数越多, 该光子晶体就越接近一个理想的光子晶体, 则其缺陷模的宽度, 即 F-P 谐振波长处的透射峰越来越窄。

4 超窄带滤波器设计

基于对称结构光子晶体主禁带内有极窄的透射峰,本文设计了一种超窄带滤波器,其工作波段位于红外通信波段 $\lambda = 1550\text{nm}$ 处。首先,根据 F-P 谐振波长条件: $\frac{2\pi}{\lambda}an_1 = m\pi$, 即 $\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{m}{2}$ ($m = 1, 2, 3, \dots$) 处,则主禁带中的透射峰位于 $\frac{\omega}{\omega_0} = 0.25, 0.75, 1.25, \dots$ 位置,要使主禁带内的透射峰对应所设计的超窄带滤波器的透过频率段,则 $an_1 = (0.25, 0.75, 1.25, \dots) \times \lambda$; 然后,根据参数分析得出的规律小范围调节各参数,进行精细调节,使光子晶体在红外通信波段 $\lambda = 1550\text{nm}$ 处透射带的透射率尽量大,且单窄带特性又很好,从而实现最佳的滤波特性。通过精细调节,当 $n_1 = 1.70, n_2 = -2.5, N = 30, n_1a = -n_2b = 0.25 \times 1550\text{nm}$ 时,其光子带隙特性如图 5 所示,在此结构光子晶体带隙中存在一个极窄的透光窗口,窗口的 3dB 宽度可做到 0.000001nm 以下,窗口内的透过率接近 100%。窗口以外的区域理论透光率为零。这种光子晶体可以用来制作超窄带滤波器,有望在光通信超密集波分复用技术和光学信息精密测量技术当中获得广泛应用。

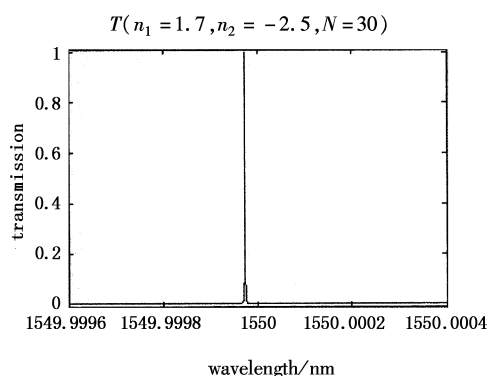


图5 超窄带滤波器透射谱($N_1 = N_2 = N$)

5 总结

本文构造了 $(AB)^{N_1}(BA)^{N_2}$ 对称型正负折射率交替一维光子晶体,并利用传输矩阵法进行数值模拟,研究了这种正负折射率交替一维光子晶体的能带结构与各参数之间的关系。结果表明:当两种介质光学厚度相等时,这种结构光子晶体的带隙比传

统的光子晶体大得多,且在主禁带内有极窄的透射带,与在对称结构光子晶体中引入一定尺寸范围的缺陷层有相似的效果^[2]。基于此,设计了一种在红外通信波段 1550nm 窗口宽度可以做到在 0.000001nm ,窗口内透过率接近 100% 的超窄带滤波器。这种结构的光子晶体可以用作超窄带滤波器,对于发展超密集波分复用光通信系统和超高精度光学信息测量仪器有重要意义。

参考文献:

- [1] Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(20):2059-2061.
- [2] Ouyang Zheng-biao, Liu Hai-shan, Li Jing-zhen. Photonic crystal super narrow optical filters [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(3):281-284.
- [3] Zhang Wen-fu, Fang Qiang, Cheng Yi-hua, et al. Narrow-band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(9):1695-1699.
- [4] Li Zhi-quan, Tian Xiu-xian, Zhu Dan-dan. The investigation for filter properties of the one-dimensional three sects photonic crystal with symmetrical structure [J]. Optoelectronic Technology, 2007, 27(3):145-151.
- [5] Zhang Yi, Wang Qi, Chen Yuan-yuan. Photonic band-gap properties and filtering application of one-dimensional multicomponent photonic crystal [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2007, 24(1):68-72.
- [6] Tang Bing-shu, Wang gang, Shen Ting-gen. Design of supernarrow band-pass filter of one-dimensional photonic crystal in negative refractive activity medium [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(1):84-87. (in Chinese)
- [7] Liu Haishan, Ou Yang Zhengbiao, Li Jingzhen. Photonic crystal WDM filters [J]. Optoelectronics · Laser, 2002, 13(2):145-149. (in Chinese)
- [8] Born M, Wolf E. Principles of optics [M]. 6th ed. New York: Pergamon, 1980:14-21.