

文章编号: 0253-2239(2002)01-0079-06

多层光子晶体滤波器研究*

欧阳征标¹⁾ 李景镇¹⁾ 张道中²⁾ 王启明³⁾

(1), 深圳大学科技研究院, 深圳 518060
(2), 中国科学院物理所光物理实验室, 北京 100080
(3), 中国科学院半导体研究所, 北京 100083

摘要: 从双层结构出发研究了一种由多块不同的单周期光子晶体组合而成的多层结构的滤波器, 论述了这种滤波器的工作原理。研究表明这种结构适于制作带通、窄带通过、带阻、宽带带阻、高通以及其它各种性能的滤波器。实验和理论研究的结果相一致。

关键词: 光滤波器; 光子晶体; 传输系数; 光子禁带

中图分类号: TN203 文献标识码: A

1 引 言

光滤波器是光子技术的基本元件之一, 在光通信和光学信息处理方面有着广泛的应用。光滤波器的质量和体积等参数直接影响到它的应用价值。光子晶体是 90 年代初出现的一种新型的人工结构材料^[1~6], 它是由高介电常数介质材料和低介电常数介质材料在空间上作周期交替排列而得到的, 其晶格常数与工作光波的波长为同一个数量级。光子晶体具有光子频率禁带, 常简称为光子禁带, 频率在禁带区内的光子是不能在光子晶体中存在的。因此, 一块光子晶体就是一个自然的理想带阻滤波器。利用金属材料制作的光子晶体在某一频率之下全是禁带区, 是理想的高通滤波器^[7,8]。而通过在光子晶体中制造缺陷或者使光子晶体的晶格常数产生微扰的方法, 可以实现窄带滤波^[9,10]。光子晶体滤波器的特点是, 滤波性能远优于普通的光滤波片, 其阻带区对透过光的抑制可以容易地达到 30 dB 以上, 而且光子晶体滤波器的带阻边沿的陡峭度可以容易做到接近于 90°。另外, 由于光子晶体都是使用对光波几乎没有损耗的介质材料制成的, 所以光子晶体滤波器对通过波段的光波的损耗非常小。

到目前为止, 光子晶体滤波器的设计没有固定的方法可循。准确的滤波特性的设计通常都是建立

在大量的数值模拟和筛选的基础上的, 不仅工作效率低, 而且计算费用高。为了克服这些缺点, 我们研究了一种新型的光子晶体滤波器——多层结构的光子晶体滤波器, 它由几块不同的单周期光子晶体组合而成。早期曾经有关于多层结构光子晶体的研究报告^[11,12], 这些研究的目的是为了增加光子禁带的宽度, 本文的目的是研究可以用于各种滤波的多层结构的光子晶体。它在设计上具有简明性、系统性以及设计计算量少等特点, 易于设计特宽的带阻滤波器 and 高品质因素的窄带滤波器, 也易于进行光滤波器的优化设计。

2 多层光子晶体滤波器的基本工作原理

我们所研究的光子晶体滤波器的结构如图 1 所示, 它由多块不同的单周期光子晶体组合而成, 每块光子晶体的结构参数和传输特性都不相同, 相邻两层光子晶体之间可以有一空气层相隔离。所用的光子晶体可以根据实际应用选择一维、二维或三维的光子晶体。

首先讨论双层结构的情况。为了简单起见, 假设这两层光子晶体中间没有空气层。设第一层和第二层光子晶体的透过率分别为 T_1 和 T_2 , 作为整体的双层结构的光透过率为 T 。

由于在光子频率禁带范围内的光子晶体的传输系数近似为零, 因此只要入射波的频率落在两块光子晶体中的任何一块的光子频率禁带区之内, 入射

* 国家自然科学基金(60177030) \ 集成光电子学国家重点联合实验室、广东省千百十工程资助课题。

收稿日期 2001-02-23; 收到修改稿日期 2001-07-16

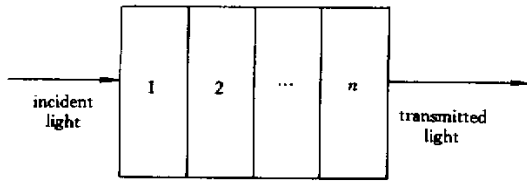


Fig.1 The structure of a multi-layer photonic crystal optical-filter

光就无法通过整个系统,即在光子频率禁带区有 $T \approx T_1 T_2 \approx 0$ 。而当入射波的频率落在光子晶体的非禁带区时,通常大部分光都能通过光子晶体,特别是在光子晶体的光子频率禁带区的边沿处的光透过率接近于 100%,因此在光子晶体的非禁带区可以忽略光波在两块光子晶体之间的反射作用,即 $T \approx T_1 T_2 \approx 1$ 。由此可知在由两块光子晶体构成双层结构系统中,无论是在光子频率禁带区还是在非禁带区均有 $T \approx T_1 T_2$ 成立。这一特点使得双层结构以及多层结构的光子晶体滤波器的设计方法可以系统化和规范化,减少大量的模拟计算和筛选的时间。

在以下关于所提出的新型光子晶体滤波器的工作原理和设计思想的讨论中,为了方便起见,对光子晶体的传输特性作了理想化处理,即假设在禁带内的传输系数为 0,在非禁带内的传输系数为 1。

图 2 所示为利用两块光子晶体实现窄带滤波的原理。当第一层透过率 T_1 和第二层的透过率 T_2 分别为图 2(a)和图 2(b)所示的形式时,两层复合结构的总的透过率 $T \approx T_1 T_2$ 具有图 2(c)所示的形式,即得到窄带滤波特性。通过调节每层或一层光子晶体的参数即可获得极窄带宽的滤波特性。

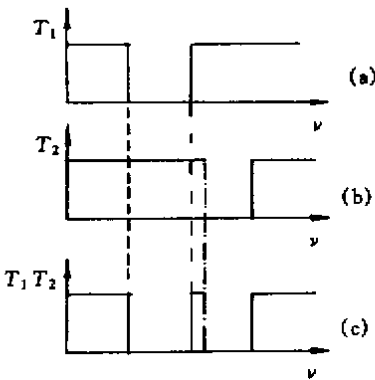


Fig.2 The operation mechanism of a narrow band-pass filter consist of two layers of photonic crystals. (a) The transmission of the first layer. (b) The transmission of the second layer. (c) The product of the transmissions of the first and second layers

图 3 所示为利用两块光子晶体实现宽带带阻滤

波的原理。这时选取的第一层和第二层的透过率 T_1 和 T_2 分别如图 3(a)和图 3(b)所示的形式,两层复合结构的总的透过率 $T \approx T_1 T_2$ 成为图 3(c)所示的形式,它具有宽带带阻滤波特性。这种双层结构的最大带阻宽度是单层光子晶体的带阻之和。要获得非常宽的带阻宽度,需要采用多个光子晶体的叠层结构。

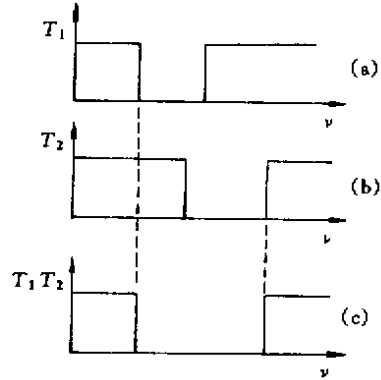


Fig.3 The operation mechanism of a wide band-pass filter consist of two layers of photonic crystals. (a) The transmission of the first layer. (b) The transmission of the second layer. (c) The product of the transmissions of the first and second layers

图 4 所示为利用两块光子晶体组合而成的高通滤波器的原理。这时第一层和第二层的透过率 T_1 和 T_2 应分别为图 4(a)和图 4(b)所示的形式,这样两层复合结构的总的透过特性就具有高通滤波作用,其透过率谱 $T \approx T_1 T_2$ 如图 4(c)所示。与其它结构的高通滤波器不同的是,这种双层结构会使得该滤波器的低端阻带宽度变大。如果采用多层光子晶体的叠层结构,可以获得非常宽的低端带阻宽度。

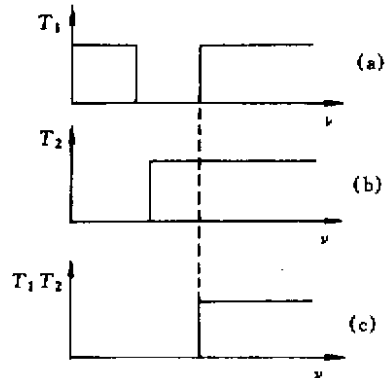


Fig.4 The operation mechanism of a high-pass filter consist of two layers of photonic crystals. (a) The transmission of the first layer. (b) The transmission of the second layer. (c) The product of the transmissions of the first and second layers

再来考察多层结构的情况。对于三层结构,可以先计算出只有第一、二层光子晶体存在时的双层结构的传输系数 $T_{1,2} \approx T_1 T_2$,这样所研究的三层结构就可以等效为一个双层结构,它由一层传输系数为 $T_{1,2}$ 的光子晶体和一层传输系数为 T_3 的光子晶体构成。根据双层结构的分析方法可以计算出该等效结构的传输系数为 $T_{1,2,3} = T_{(1,2),3} \approx T_1 T_2 T_3$ 。类似地,任意层数 n (大于 3) 的多层结构的分析可以按照同样的步骤来分析,最后不难得出其总的传输系数 $T = T_1 T_2 \dots T_n$ 。

以上给出了各种功能的多层结构的光子晶体滤波器的工作原理。在实际应用中,可以先计算出一系列单周期结构光子晶体的传输系数谱,作为标准谱库存储起来,以便随时调用。在设计滤波器时,只需按设计要求选取适当光子禁带特性的光子晶体即可以达到基本设计目标。当需要用到标准谱库以外的谱时,可以利用麦克斯韦方程的频率和空间的比例伸缩变化关系对标准谱库中的谱加以变换而得到。因此在设计过程中可以减少大量的数值模拟计算和筛选工作。

3 研究方法

在以上关于多层光子晶体的工作原理的介绍中采用的是近似的方法,为了论证这种方法的可行性,我们采用多重散射法^[13,14]对下面几种多层结构的光子晶体滤波器进行严格的数值模拟研究。

本文以下所涉及到的各种周期的光子晶体均选取为由介质杆排列而成的二维光子晶体。在这样一个系统中,通常采用 s 极化波(其电场方向平行于介质杆的轴向,以下设为 z 方向)。这时在光子晶体内部非介质杆所在的区域或光子晶体外部任一点 P 的场的计算公式为

$$E_z(P) = E_z^{\text{inc}}(P) + \sum_{j=1}^N \sum_{m=-\infty}^{+\infty} b_{jm} H_m[kr_j(P)] \exp[i m \theta_j(P)], \quad (1)$$

其中 $E_z^{\text{inc}}(P)$ 为入射波对 P 点的场的直接贡献, k 为波数, $r_j(P)$ 、 $\theta_j(P)$ 为第 j 根杆到 P 点的矢量的极坐标参数, H_m 为 m 阶第一类汉克尔函数, N 为介质杆的数目, b_{jm} 为与介质杆的参数有关的待求系数。根据散射理论可以写出关于 b_{jm} 的方程组,它只能通过计算机进行数值求解。

本文采用平面波 $E_0 \exp(ikx)$ 经过狭缝衍射后的输出光作为光子晶体的入射光,它可由基尔霍夫

(Kirchhoff) 积分公式写出为

$$E_z^{\text{inc}}(x, y) = \left(\frac{k}{4}\right) E_0 \times \int_{-w/2}^{w/2} dy' \left[H_0(k\rho) + i \left(\frac{x}{\rho}\right) H_1(k\rho) \right], \quad (2)$$

其中 $\rho = [x^2 + (y - y')^2]^{1/2}$, w 为狭缝的 y 方向宽度, H_0 和 H_1 分别为 0 阶和 1 阶第一类阶汉克尔函数。狭缝中心轴线方向平行于介质杆的轴向(z 方向)。

根据式(1)式和(2)式就可以求出散射场。根据所求得的散射场可以进一步求出光子晶体的透过率等参数。光通过光子晶体的透过率定义为从光子晶体的右边输出的光波的能量与从光子晶体的左边进入的能量的比值。我们在本文中定义一个相对透过率,它是指在入射波作用下,在所研究的区域有光子晶体存在和没有光子晶体存在时的透过率的比值。在以下的研究中我们所指的透过系数均是指相对透过率。

在本文的实验研究当中,利用美国惠普公司生产的微波矢量网络分析仪来进行透过谱的测量。从网络分析仪出来的扫频信号通过同轴波导被引入含有待测样品的测试室,经过样品后的输出信号再引入到网络分析仪的分析输入端。透过谱通过数据磁盘记录下来。

不失一般性和方便进行实验研究,本文选取工作波段为微波区域。容易证明,当所研究的空间尺度 (L_x, L_y, L_z) 变为 $(\lambda L_x, \lambda L_y, \lambda L_z)$, 则在麦克斯韦方程中引入变换 $(x, y, z) \rightarrow (\lambda x, \lambda y, \lambda z)$, $\omega \rightarrow \omega/\lambda$ 时,下式的麦克斯韦方程的形式完全不变:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} - \frac{\epsilon(x, y) \omega^2}{c^2} \mathbf{E} = 0, \quad (3)$$

其中 c 为真空中的光速, ω 为光波的圆频率, $\epsilon(x, y)$ 为相对介电常数,它是空间变量 x 和 y 的函数。这就是麦克斯韦方程的频率和空间的比例伸缩变化关系式。根据这个变化关系可以将本文得到的研究方便地变换到任意波长区域。

4 数值模拟和实验研究验证

从关于多层光子晶体滤波器的工作原理的分析中可知,双层结构是研究多层结构的基础,多层结构的分析可以看成是双层结构的分析过程的多次重复。因此,只需对双层结构光子晶体滤波器的工作原理进行数值模拟和实验研究的验证。

我们首先给出一个双层结构的窄带滤波器的研究结果,如图 5 所示。该滤波器的工作参数如下:两块光子晶体是由半径分别为 $r_1 = 2 \text{ mm}$ 和 $r_2 = 3.5 \text{ mm}$ 、相对介电常数均为 $\epsilon = 8.9$ 的介质杆在空气中排列而成的二维光子晶体;每一块光子晶体中共有 5 层介质杆;第一块和第二块光子晶体的晶格常数分别为 $d_1 = 7 \text{ mm}$ 和 $d_2 = 12 \text{ mm}$ 。图 5(a) 为每块晶体单独存在时的透过系数(数值模拟结果)。从图 5(a)可以看出这两块光子晶体的传输系数相乘有利于产生窄带滤波特性。图 5(b) 为作为整体的双层结构的总透过系数($T_{1,2}$)的数值模拟结果。从图 5(b)可以看出,在频率为 9 GHz 附近存在一个窄的透过窗口,在这个透过窗口的两边是较宽的带阻区。这说明所设计的结构具有良好的窄带滤波作用。为了方便比较,在图 5(b)中还示出了两块光子晶体单独存在时的传输系数的简单乘积 $T_1 T_2$ 。可以看到, $T = T_{1,2} \approx T_1 T_2$ 是较好的近似。这再次说明了我们的设计思想的正确性。

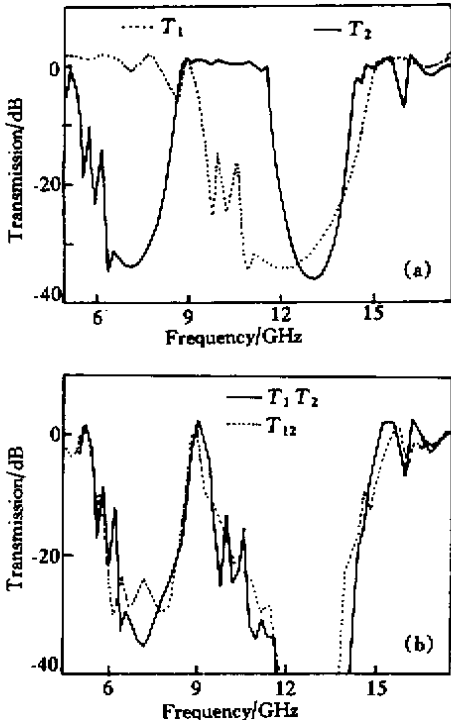


Fig.5 The transmission spectrum obtained by numerical modeling. (a) The transmission spectrum T_1 and T_2 of the two separate photonic crystal laers; (b) The transmission spectrum $T_{1,2}$ of the two layers as a whole compared with the product $T_1 T_2$

我们现在给出一个双层结构的宽带带阻滤波器的研究结果,如图 6 所示。该滤波器的工作参数如下:两块光子晶体均是由半径为 $r = 2 \text{ mm}$ 、相对介电常数为 $\epsilon = 8.9$ 的介质杆在空气中排列而成的二

维光子晶体,每一块光子晶体中共有 5 层介质杆;第一块和第二块光子晶体的晶格常数分别为 $d_1 = 8 \text{ mm}$ 和 $d_2 = 14 \text{ mm}$ 。图 6(a) 示出了每块晶体单独存在时的透过系数(数值模拟结果)。从图 6(a)可以看出这两块光子晶体的传输系数相乘有利于产生宽带带阻滤波特性。图 6(b) 给出了作为整体的双层结构的总透过系数($T_{1,2}$)的数值模拟结果。图 6(b) 的结果显示,所设计的结构的阻带宽度约等于两个单层结构的阻带宽度之和,实现了宽带带阻功能。为了方便比较,在图 6(b)中还示出了两块光子晶体单独存在时的传输系数的简单乘积 $T_1 T_2$ 。从图 6(b)还可以看出, $T \approx T_1 T_2$ 任然是相当好的近似。这表明我们的设计思想是可行的,即从单块光子晶体的传输系数谱出发就可以做出较准确的设计,从而给设计带来了极大的方便。

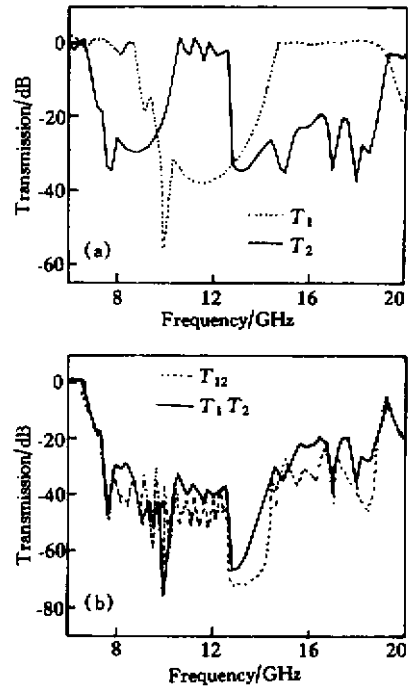


Fig.6 The transmission spectrum obtained by numerical modeling. (a) The transmission spectrum T_1 and T_2 of the two separate photonic crystal layers; (b) The transmission spectrum $T_{1,2}$ of the two layers as a whole compared with the product $T_1 T_2$

图 5 和图 6 表明多层结构光子晶体滤波器在原理上是可行的。

图 7 给出了该滤波器的实验测量结果与理论模拟结果的比较。从图 7 可以看出,数值模拟和实验测量的结果在大部分频率上,传输系数低于 -50 dB 时仍然符合得很好,只是在部分高频区二者之间存在一些偏离。这种偏离的主要原因是实验所用的材

料的介电常数随频率会发生一些改变,从而导致光子晶体的禁带特性和传输特性发生一些变化,而我们在进行数值模拟时并未考虑到介质的介电常数受频率影响这个因素。但由于在所研究的频率范围内,实验所用的介质的介电常数在高频区的变化不是很大,所以实验测量的结果与数值模拟的结果的偏差都是在 -30 dB 以下出现的。

图 7 的结果进一步证实了多层结构光子晶体滤波器在原理和实验上的可行性。考虑到单层及双层结构的光子晶体的制造是比较容易的,而多层结构光子晶体的制造工艺会比较烦琐,在实际应用中可以用几块不同特性的单层结构和几块不同特性的双层结构的光子晶体叠层来获得所需要的多层光子晶体滤波器结构。因此,多层光子晶体滤波器在实用上也是可行的。

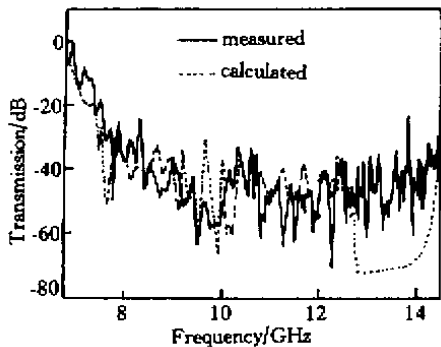


Fig.7 Comparison between the theoretical and experimental transmission spectrum. Parameters are the same as that in Fig.6

虽然以上结果是在 7 GHz ~ 14 GHz 波段得到的,似乎只是一个较小的频率区间,但是所研究的频率范围已经达到了中心频率的 30% 以上,可见其相对频率范围是比较大的。另外,根据麦克斯韦方程的频率-空间变换的比例伸缩不变性可知,以上研究结果可以推广到其它电磁波波段,包括光波波段。

由于采用了狭缝光源,与平面波入射不同,无论待研究样品是否存在,光波除了沿左右方向(侧面)传播外,总有部分能量向上下两个方向传播。但是,在有待研究样品存在时,原本向侧面传播的光波中的一部分会折向右边方向传播,产生弱聚焦效应,使得相对折射率会大于 1 ,即大于 0 dB,如图 5 ~ 图 7 所示。

还需指出的是,由于在光子禁带区波幅度随深入光子晶体的距离按指数规律变小,所以带阻区的波的抑制分贝数可以通过增加每层光子晶体的厚度来实现所需要的数值。本文中为了节省计算量,每

层光子晶体的厚度仅为 5 层。

结束语 本文研究了一种多层结构的光子晶体滤波器,它由几块不同的单周期晶体组合而成,每块光子晶体的晶体参数和传输特性都不相同。文中论述了它的工作原理。通过对双层结构的光子晶体滤波器的理论数值模拟和实验测量验证了它在原理和实用上的可行性。这种结构适于制作带通滤波器、窄带通过滤波器、带阻滤波器、宽带带阻滤波器和高通滤波器等各种功能的滤波器。多层结构的光子晶体滤波器在设计上具有简明性、系统性以及设计计算量少等特点,易于设计特宽的带通滤波器和高品质因素的窄带滤波器,也易于进行光滤波器的优化设计。

感谢北京物理所的程炳英高级工程师、金崇君博士和孟晓东硕士生实验方面提供的有益帮助。感谢中国科学院计算所给予的机时支持。

参 考 文 献

- [1] Yablonovitch E, Gmitter T J, Leung K M. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67**(17): 2259 ~ 2262
- [2] Soukoulis C M. Ed. *Photonic Band Gap Materials*. Dordrecht (The Netherlands): Kluwer Academic Publishers, 1996
- [3] Cheng Z D, Russell W B, Chaikin P M. Controlled growth of hard-sphere colloidal crystals. *Nature*, 1999, **401**(6756): 893 ~ 895
- [4] Qin Bai, Jin Chongjun, Qin Ruhu. Experimental study of photonic crystal triangular lattices. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1999, **19**(2): 239 ~ 242 (in Chinese)
- [5] Jin C J, Cheng B Y, Li Z L, et al.. Two-dimensional metallic photonic crystal in the THz range. *Opt. Commun.*, 1999, **166**(1~6): 9 ~ 13
- [6] Quyang Zhengbiao, Li Jingzhen. Advanced in the research of photonic crystals. *Laser Journal*(激光杂志), 2000, **21**(2): 4 ~ 6 (in Chinese)
- [7] Sigalas M M, Chan C T, Ho K M et al.. Metallic photonic band-gap materials. *Phys. Rev. (B)*, 1995, **52**(16): 11744 ~ 11751
- [8] Gupta S, Tuttle G, Ho K M et al.. Infrared filters using metallic photonic band gap structures on flexible substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(17): 2412 ~ 2414
- [9] Sigalas M M, Soukoulis C M, Economou E N et al.. Photonic band gaps and defects in two dimensions: Studies of the transmission coefficient. *Phys. Rev. (B)*, 1993, **48**(19): 14121 ~ 14126
- [10] Lei X Y, Li H, Ding F et al.. Novel application of a perturbed photonic crystal: High-quality filter. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(20): 2889 ~ 2891
- [11] Zi J, Wan J, Zhang C. Large frequency range of negligible transmission in 1-D photonic quantum well

structures. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(15):2084 ~ 2086

- [12] Zhang C, Qiao F, Wan J *et al.*. Enlargement of nontransmission frequency range in photonic crystals by using multiple heterostructures. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**(6) 3174 ~ 3176
- [13] Tayeb G, Maystre D. Rigorous theoretical study of finite-

size two-dimensional photonic crystals doped by microcavities. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1997, **14**(12): 3323 ~ 3332

- [14] Li L M, Zhang Z Q. Multiple-scattering approach to finite-sized photonic band-gap materials. *Phys. Rev. (B)*, 1998, **58**(15) 9587 ~ 9590

Investigations on Multi-Layer Photonic-Crystal Optical-Filters

Ouyang Zhengbiao¹⁾ Li Jingzhen¹⁾ Zhang Daozhong²⁾ Wang Qiming³⁾

- (1), *Department of Opto-Electronics, College of Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060*
- (2), *Optical Physics Laboratory, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*
- (3), *National Key Laboratory of Integrated Opto-Electronics, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*

(Received 23 February 2001 ; revised 16 July 2001)

Abstract : A new optical-filter structure consisted of a number of pieces of 1-D photonic crystals, each of which with a different lattice constant, and its operation mechanism are presented. Numerical and experimental studies are performed and their results are in good accordance with each other. This structure can be applied to build different kind of filters, such as low-pass filters, band-pass filters, narrow-band-pass filters and high-pass filters, etc. Extraordinary wide band-stop and extremely narrow band-pass filters can be easily realized with such a structure.

Key words : optical filter ; photonic crystal ; transmission coefficient ; photonic band gap