

基于一维光子晶体超晶格的多通道平顶透射特性*

韩鹏, 黄洁彬, 陈超雄, 杨冠玲

(华南师范大学 物理与电信工程学院, 广州 510006)

摘要:基于一维光子晶体超晶格理论及耦合腔理论, 提出了一种具有多个平顶透射峰的超晶格结构. 把传统单一材料的耦合腔换成有限周期的光子晶体结构, 形成一种超晶格结构. 通过使插入的光子晶体的光场有效耦合, 能够产生多个平顶透射峰. 运用传输矩阵法, 研究了该结构的光谱特性以及结构和材料参量对透射峰的位置和半峰全宽的影响. 计算结果表明, 该结构具有较宽的带隙, 并且多个平顶透射峰对称分布, 透射率高, 误差容忍度好. 详细讨论了透射峰确切位置的计算方法, 并给出了严格的解析表达式.

关键词:光子晶体; 超晶格; 多通道滤波; 平顶透射峰

中图分类号: O734

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)02-272-5

0 引言

光子晶体是按照晶体的对称性制备的周期性介电结构^[1-2]. 由于其本身具有很多独特的性质, 近年来, 光子晶体作为一种新型的光学功能材料, 已经受到了广泛关注.

光学多通道滤波器的特点是在一个光子带隙内具有多个透射率高的窄带透射峰. 由于其在光学领域中潜在的应用, 引起了人们的注意. 这种多通道滤波特性能够通过很多方法获得, 例如: 基于法布里-珀罗原理设计^[3-4], 双周期光子晶体结构^[5], 光子量子阱结构^[6-10]等. 然而, 按照这些方法设计的结构, 其多个透射峰是尖峰型的. 由于尖峰型透射峰位置上的微小变化会导致透射率的显著变化, 在实际应用具有较大的局限性.

利用耦合腔结构能够解决以上问题^[11-15]. 该结构利用多个腔中光场的共振, 使尖峰型的透射峰平顶化. 该平顶透射峰具有很多独特的性质^[11-15]. 例如, 较高的误差容忍度, 更有利于能量的透射, 其陡峭的边缘还能改进截止度等等.

在一维对称光子量子阱结构^[16]的基础上, 本文设计成超晶格结构, 并使结构中多个阱区的光场有效地耦合在一起, 获得了具有平顶透射峰的多通道滤波特性. 理论计算结果表明, 该结构不仅具有对称分布的多个平顶透射峰, 还有较高的误差容忍度. 分析了结构和材料参量对透射峰的影响, 并详细给出了这些透射峰确切位置的计算方法.

1 结构模型

众所周知, 耦合腔结构能形成性能优越的平顶

透射峰. 耦合腔结构^[11-15]能用一种简单的形式来表示: $[(AB)^m CB]^n$, 如图 1, 其中 m 和 n 为正整数, 对于耦合结构, $\Omega=C$, 对于超晶体 $\Omega=(CD)^p$. 由光子晶体的角度, C 是晶体的一个缺陷. 该结构中有 n 个 C 微腔, 各腔之间约有 m 个周期单元. 当各腔互相有效耦合, 最终能够形成平顶透射峰. 其中, C 微腔能够由各种结构构成. 如果 C 微腔由材料 A (或 B) 组成, 那么 C 微腔跟 A 层 (或 B 层) 的区别就在于其厚度的不同.

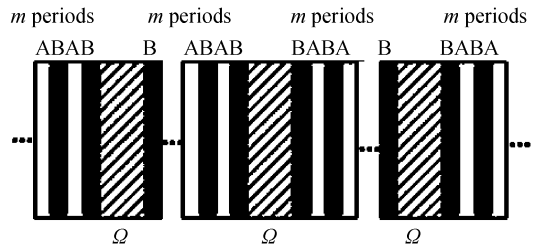


图 1 结构示意图, 对于耦合腔结构, $\Omega=C$; 对于超晶格结构 $\Omega=(CD)^p$

Fig. 1 Sketch map of the calculated structure

如果用一个本身具有多透射峰的结构代替 C 微腔, 可能实现多个平顶透射峰. 由光子晶体超晶格以及光子量子阱性质可知, 阱区光子晶体具有多透射峰. 因此, 将上述结构中的 C 微腔换成一个有限周期的光子晶体结构: $(CD)^p$, 那么可以得到结构: $[(AB)^m (CD)^p B]^n$. 为方便, 以下用 $S_{m,p,n}$ 来表示. 从结构形式看, $S_{m,p,n}$ 仍然是超晶格结构. 其中, 垒区为 $(AB)^m$, 或 $(BA)^m$, 而阱区为 $(CD)^p$. 需要指出的是, 为了实现平顶透射峰, 要使阱区光子晶体的各透射峰都能够互相有效地耦合, 所以, 垒区不能过宽, 即 m 不宜过大.

2 理论计算与分析

为了简化结构, 在下面的计算中 C 和 D 的材料

* 国家自然科学基金(10504008)资助

Tel: 020-88239467 Email: hanp@scnu.edu.cn

收稿日期: 2007-09-25

分别跟 A 和 B 相同,但厚度分别是其两倍.即 $C=2A, D=2B$. 选取 A、B 两层材料的折射率分别为: $n_A=1.23, n_B=3.5$, 分别对应的是氟化钙和碲化镉在近红外区的折射率,且这两种材料可以运用相同的制备技术^[11-12],光学厚度均为 $\lambda_0/4$ (λ_0 为 $1/4$ 波栈带隙中心频率 ω_0 对应的波长). 为了系统了解结构的光学性质,分析一下单个阱区的情况: $(AB)^m ((2A2B)^p (2A))(BA)^m$, 这里,加入了一层 C (即 $2A$) 构成对称结构. 运用传输矩阵法^[11-12] 计算垂直入射时该结构的光谱特性. 计算中,取 $m=2, p=8$, 选定该结构的衬底为玻璃,其折射率为 1.5, 得到图 2.

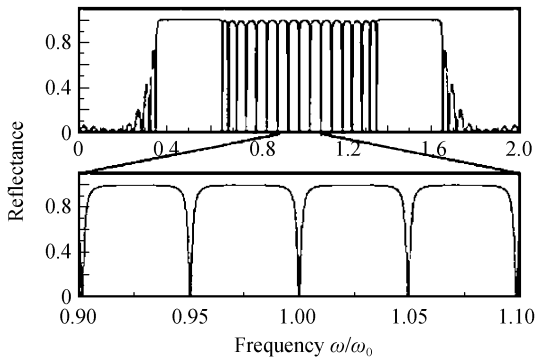


图 2 一维光子量子阱结构 $(AB)^2 ((2A2B)^8 (2A))(BA)^2$ 的反射谱

Fig. 2 Reflective spectra for 1D photonic QW structure $(AB)^2 ((2A2B)^8 (2A))(BA)^2$

如图 2, 在较宽的带隙上以 ω_0 为中心对称分布着多个透射峰, 这样就形成了宽带隙多通道滤波的现象. 其中, 较宽的带隙是由势垒和势阱的带隙叠加而成^[17-19], 而当中带隙上的透射峰由势阱的通带透射峰决定. 另外, 可以看到, 其透射峰是尖峰型, 该型在某些方面上会不利于实际的运用.

当阱区数目增加时, 阱区之间会相互影响. 则构造了超晶格 (SL) 结构: $[(AB)^m ((2A2B)^p (2A)) B]^n$, 为方便以下用 $S_{m,p;n}$ 表示. 为了使势阱之间能够相互较好地耦合, $S_{m,p;n}$ 结构的势垒周期数 m 应该取较小值. 以下取 $m=1, n=3$, 其他参量跟图 2 的相同. 通过计算可得到图 3.

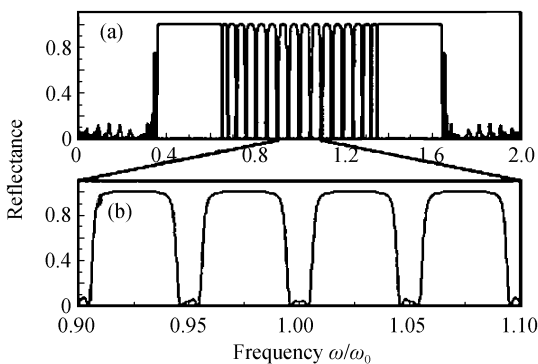
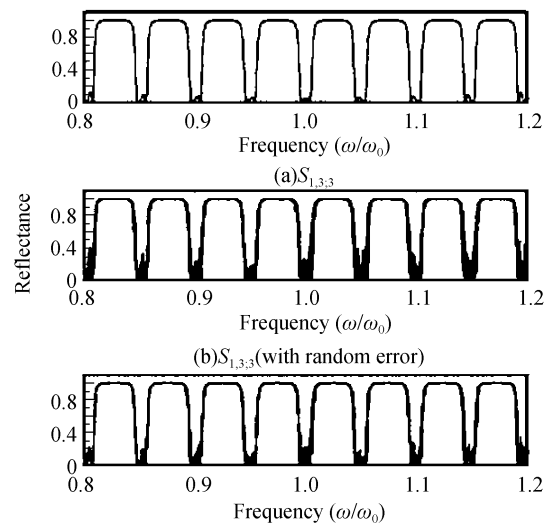


图 3 $S_{1,8;3}$ 结构的反射谱

Fig. 3 Reflective spectra for $S_{1,8;3}$ structure

如图 3(a), $S_{1,8;3}$ 结构的反射谱是关于 ω_0 对称的, 具有跟 $(AB)^2 ((2A2B)^8 (2A))(BA)^2$ 相似的宽带隙多通道滤波的特性. 如图 3(b), 对于 $S_{1,8;3}$ 结构, 在较宽的带隙上, 以 ω_0 为中心对称分布着的多个透射峰是平顶峰. 并且, 越接近中心频率 ω_0 的平顶峰越接近理想的平顶峰.

如果在原来参量的基础上, 在材料中增加随机误差, 那么通过数值计算可得到图 4. 图 4(a) 是没有厚度误差时该结构的反射谱, 图 4(b) 是在每层材料 A 中增加 $\pm 1.5\%$ 的随机误差时该结构的反射谱, 图 4(c) 考虑了每个周期单元的各层材料的光程的相互补偿, 即保持周期单元的光程不变, 当其中一层材料的厚度增加了 $\pm 1.5\%$ 的随机误差时, 使另外一层材料的厚度相应改变, 使两层材料的光程相互补偿; 这种光程的相互补偿可以根据应用薄膜光学^[11] 中提到的极值控制法的监控技术在实际制作中实现.



(c) $S_{1,8;3}$ (with random error and taking the compensation of light paths of the two materials in each unit into account)

图 4 $S_{1,8;3}$ 结构的反射谱

Fig. 4 Reflective spectra for $S_{1,8;3}$ structure

如图 4, 当在结构中增加一定的厚度的随机误差时, 带隙上平顶透射峰的位置基本上没有改变; 而且仍然能保持较高的透射率; 且考虑了每个周期单元的各层材料的光程的相互补偿之后, 弥补随机误差影响的效果更好. 另外, 如果只是材料 B 每层增加类似的随机误差, 或是两个材料都加入类似的随机误差也都能得到类似的结果. 因此, 该结构具有很好的误差容忍度; 更有利于实际的应用.

为了研究该结构在不同折射率比时其平顶透射峰的带宽特性, 在保持 $n_A=1.23$ 的情况下, 取不同的 n_B 值, 而其他参量都保持不变, 计算该结构各平顶透射峰的半峰全宽. 可得到图 5.

如图 5, 随着 n_B 变大, 平顶透射峰的带宽将变小. 而如果保持材料 B 的折射率不变增大材料 A 的

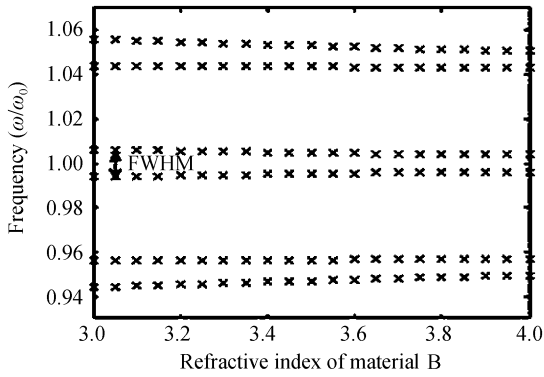


图5 不同折射率情况下各平顶透射峰的半峰全宽
Fig. 5 FWHMs of the transmission peaks to different refraction

折射则会使得得到相反的结果. 所以, 可以通过调整 A、B 两层材料的折射率比得到实际应用中需要的带宽. 另外, 这样做还带来透射峰位置的微小变化.

还可以通过改变周期数 p 的大小来调整平顶透射峰的带宽^[20]. 保持其他的参量不变, 通过数值计算得到图 6. 如图 6, p 越大, 带宽越小. 同时, 平顶峰的位置逐渐向中心频率靠拢. 另外, 由于这些透射峰由阱区的通带透射峰决定, 那么随着 p 的增大, 平顶峰的数目也将会增加.

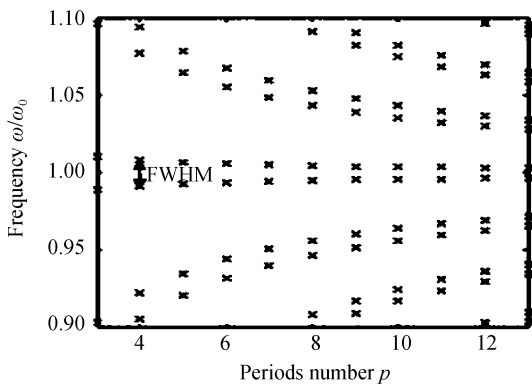


图6 不同周期数 p 对应的各平顶透射峰的半峰全宽
Fig. 6 FWHMs of the transmission peaks to the periods number p

3 透射峰位置的确定

由于势阱 $(2A2B)^p(2A)$ 处于 $S_{m,p;n}$ 结构中, 在其两旁分别有一层材料 B, 如果加上这两层材料 B 就构成了这样的结构: $B(2A2B)^p(2A)B$, 结构为对称膜系, 而且该结构也是 $S_{m,p;n}$ 结构的一个组成部分. 又由于 $S_{m,p;n}$ 结构的带隙上的多个平顶透射峰由势阱的通带透射峰决定. 为研究其多个平顶透射峰的位置跟其组成部分 $B(2A2B)^p(2A)B$ 的通带透射峰的位置的联系, 借助 $S_{m,p;n}$ 结构和 $B(2A2B)^p(2A)B$ 结构的反射谱, 采用图 3 的参量, 通过计算得到图 7.

如图 7, $S_{m,p;n}$ 结构带隙上的多个平顶透射峰的位置基本上与 $B(2A2B)^p(2A)B$ 结构的相应的通带

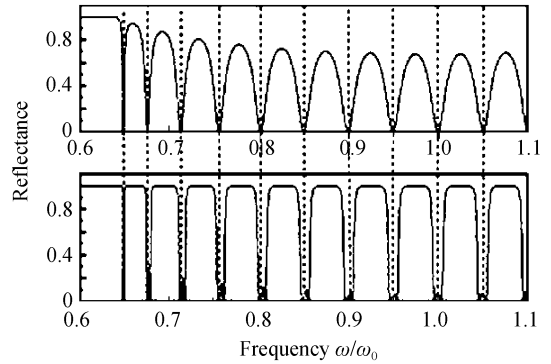


图7 $B((2A2B)^8(2A))B$ 结构和 $S_{1,8;3}$ 结构的反射谱
Fig. 7 Reflective spectra for $B((2A2B)^8(2A))B$ structure and $S_{1,8;3}$ structure

透射峰的位置一一对应. 由于对称结构 $B(2A2B)^p(2A)B$ 的通带透射峰的位置可以用解析的方法加以确定, 相应的 $S_{m,p;n}$ 结构带隙上的多个平顶透射峰的位置也可以用解析的方法确定.

由于结构 $B(2A2B)^p(2A)B$ 可以化为 $[B2AB]^{p+1}$, 即为 $[H2LH]^{p+1}$ 这样的对称周期结构, 所以其通带透射峰可以根据应用薄膜光学^[11] 中的等效方法来确定.

多层膜系的基本周期单元 $[B2AB]$ 的等效位相厚度为

$$\Gamma = \cos^{-1} \left[\cos^2 \delta_{2A} - \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right) \sin^2 \delta_{2A} \right] \quad (1)$$

式中, δ_{2A} 是两层材料 A 的位相厚度, 则结构 $B(2A2B)^p(2A)B$ 总的等效位相厚度为 $(p+1)\Gamma$.

若令 $\omega = x\omega_0$, 则

$$\delta_{2A} = \frac{2\pi}{\lambda} n_A d_A = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda_0}{2} = \pi \frac{\lambda_0}{\lambda} = \pi \frac{\omega}{\omega_0} = \pi x \quad (2)$$

如果是在 $0 \sim \omega_0$ 这一频段内的透射峰, 那么单个周期的等效位相厚度 Γ 必须满足

$$\Gamma = \frac{k\pi}{(p+1)} \quad (3)$$

式中, $k=1, 2, \dots, p, p+2, \dots, 2(p+1)$, 把式(2)和式(3)代入式(1)得到

$$x = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left[\pm \sqrt{\frac{\cos \left(\frac{k\pi}{p+1} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right)}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{n_B}{n_A} + \frac{n_A}{n_B} \right)}} \right] \quad (4)$$

对应于 $B(2A2B)^p(2A)B$ 结构的光谱, 当 $k=1, 2, \dots, p$ 时, 式(4)中的“ \pm ”号取“ $+$ ”号, 此时, x 对应 $0 \sim \omega_0$ 这一频段带隙左边的 p 个通带透射峰的位置; 当 $k=p+2, p+3, \dots, 2(p+1)$ 时, 式(4)中的“ \pm ”号取“ $-$ ”号, x 的值对应带隙右边的几个通带透射峰的位置; 后者对应的 p 个通带透射峰即为所关注的通带透射峰. 因此, 在图 5 中, 当改变材料 B 的折射率时平顶透射峰的位置会产生微小变化.

另外还需指出的是, 当 $k=p+1$ 时, Γ 对应的等

等效位相厚度不是通带频率的等效位相厚度,而是带隙部分的,后者是一个实部相同,虚部不同的复数.再根据对称性,可以确定 $\omega_0 \sim 2\omega_0$ 上对应的 p 个通带透射峰的位置.再加上中心 ω_0 上的透射峰,所关注的对称结构 $B(2A2B)^p(2A)B$ 两个带隙之间的 $2p+1$ 个通带透射峰的位置都已确定.从而,本文所设计的 $S_{m,p,n}$ 结构宽带隙上的 $2p+1$ 个平顶透射峰的位置也就确定了.那么,在图 6 中,当增加周期数 p 的值时平顶峰的位置逐渐向中心频率靠拢,并且平顶峰的数目也有相应的增加.

4 结论

本文基于一维光子晶体超晶格理论和耦合腔理论,设计了一种新型结构.该结构具有较宽的带隙,并且在带隙上对称分布了多个平顶透射峰.这些平顶透射峰具有较宽的带宽,能一定程度上弥补制作时可能出现的厚度误差或其他因素造成的透射峰位置的细微偏差对滤波的影响,因而具有较高的误差容忍度;更重要的是这些平顶透射峰的位置还可以用解析的方法加以确定.此外,由于该结构只采用两种材料,因此比较容易实现,对于制作高性能宽带隙高容忍度的多通道滤波器,它将是一个非常好的设计方案.

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059-2061.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
- [3] PELLETIER E, MACLEOD H A. Interference filters with multiple peaks[J]. *J Opt Soc Am*, 1982, **72**(6): 683-686.
- [4] GU Pei-fu, YANG Yu-min, CHEN Hai-xing, *et al.* Interference filters with multiple transmittance peaks used for wavelength division multiplexing systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **32**(7): 837-839.
顾培夫, 杨毓铭, 陈海星, 等. 用于波分复用系统的多峰干涉滤光片[J]. *光子学报*, 2003, **32**(7): 837-839.
- [5] QIN Q, LU H, ZHU S N, *et al.* Resonance transmission modes in dual-periodical dielectric multilayer films[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, **82**(26): 4654-4656.
- [6] JIANG Y, NIU C, LIN D L. Resonance tunneling through photonic quantum wells[J]. *Phys Rev B*, 1999, **59**(15): 9981-9986.
- [7] QIAO Feng, CHUN Zhang, JUN Wan, *et al.* Photonic quantum-well structures: Multiple channeled filtering phenomena[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, **77**(23): 3698-3670.
- [8] YANO S, SEGAWA Y, BAE J S, *et al.* Quantized state in a single quantum well structure of photonic crystals[J]. *Phys Rev B*, 2001, **63**(15): 153316-153319.
- [9] XU S H, XIONG Z H, GU L L, *et al.* Photon confinement in one-dimensional photonic quantum-well structures of nanoporous silicon[J]. *Solid State Communications*, 2003, **126**: 125-128.
- [10] LIU Dan-dong, CHEN Guang-de, XU Zhong-feng. A switching mechanism based on photonic quantum-well effects[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1321-1324.
刘丹东, 陈光德, 徐忠锋. 基于量子阱效应的光开关[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1321-1324.
- [11] TANG Jin-fa, ZHENG Quan. Applied thin-film optics[M]. Shanghai: Science and Technology Press, 1984.
唐晋发, 郑权. 应用薄膜光学[M]. 上海: 科学技术出版社, 1984.
- [12] MACLEOD H A. Thin-film optical filters, 2nd edition[M]. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1989.
- [13] BAVINDIR M, KURAL C, OZBAY E. Coupled optical microcavities in one-dimensional photonic bandgap structures[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2001, **3**: S184-S189.
- [14] SUN Zhi-hong. The study of the defect modes and coupling characteristics of photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 984-989.
孙志红. 光子晶体局域缺陷模及耦合特性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 984-989.
- [15] DONG Hai-xia, JIANG Hai-tao, YANG Cheng-quan, *et al.* Properties of impurity band in one-dimensional photonic crystal coupled-resonator containing defect layers with negative refractive index[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(6): 2777-2780.
董海霞, 江海涛, 杨成全, 等. 含双负缺陷的一维光子晶体耦合腔的杂质带特性[J]. *物理学报*, 2006, **55**(6): 2777-2780.
- [16] CHEN Chao-xiong, HUANG Jie-bin, HAN Peng, *et al.* Multiple channeled filtering in one dimensional symmetric photonic quantum-well structures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **37**(8): 1571-1575.
陈超雄, 黄洁彬, 韩鹏, 等. 一维对称光量子阱结构的多通道滤波特性研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1571-1575.
- [17] HAN P, WANG H Z. Extension of omnidirectional reflection range in one-dimensional photonic crystals with a staggered structure[J]. *J Opt Soc Am B*, 2003, **20**(9): 1996-2001.
- [18] HAN P, WANG H Z. Criterion of omnidirectional reflection in a one-dimensional photonic heterostructure[J]. *J Opt Soc Am B*, 2005, **22**(7): 1571-1575.
- [19] ZHANG Yu-ping, YAO Jian-quan, ZHANG Huiyun, *et al.* Bandgap extension of disordered 1D ternary photonic crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1094-1098.
张玉萍, 姚建铨, 张会云, 等. 无序一维三元光子晶体的带隙展宽[J]. *光子学报*, 2005, **34**(7): 1094-1098.
- [20] CHEN Xian-feng, SHEN Xiao-ming, JIANG Meiping, *et al.* Studies on the defect mode properties of 1D photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1876-1880.
陈宪锋, 沈小明, 蒋美萍, 等. 一维光子晶体的缺陷模特性研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1876-1880.

Multiple Channeled Flat-top Transmission of One-dimensional Photonic Crystal Super-lattice

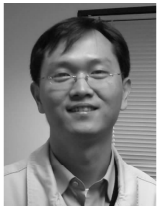
HAN Peng, HUANG Jie-bin, CHEN Chao-xiong, YANG Guan-ling

(School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Received date: 2007-09-25

Abstract: Based on the principle of one-dimensional photonic crystal super-lattice and coupled optical microcavities, a new scheme to achieve multiple channeled optical filters with flat-top transmission peaks was presented. The traditional cavities of single material were replaced by photonic crystals with finite period, and thus a super-lattice structure was constructed. Using transfer-matrix method, the structural spectra and the influence of the structural and material parameters on the locations and the FWHMs of the transmission peaks were studied. The numerical results show that this structure has a rather wide photonic band gap, in which there are multiple flat-top transmission peaks. These peaks are symmetrical, with high transmission rate and high error tolerance. The locations of these peaks can be calculated exactly, and the strict analytic expression was presented.

Key words: Photonic crystal; Super-lattice; Multiple-channeled filtering; Flat-top transmission peaks



HAN Peng was born in 1976. He received his Ph. D. degree in science from Zhongshan University in 2004. Now he is an associate professor at South China Normal University, and his research interests focus on photonic crystals and optoelectronics.