

准分形光子晶体多频带隙的特性及其应用*

李岩^{1,2,3} 郑瑞生³ 冯玉春³ 牛慈笨^{1,3}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100864)

(3 深圳大学光电子学研究所, 广东省光电子器件与系统重点实验室, 广东 518060)

摘要 用时域有限差分方法计算了多种准分形结构光子晶体的能带. 数值计算结果表明, 这些结构的光子晶体存在多频带隙的特点, 且带隙的宽度及中心频率以及带隙中导带的中心频率均随准分形光子晶体单胞内结构单元几何形状的改变而改变.

关键词 光子晶体; 带隙; 分形; 滤波器

中图分类号 O482.3; TN713

文献标识码 A

0 引言

近年来, 光通信技术的发展对光滤波器件提出了越来越高的要求. 目前在光通信领域使用的滤波器主要是: 薄膜干涉型滤波器、光纤光栅型滤波器和排列波导型滤波器^[1]. 虽然这些器件已被广泛应用于波分复用和密集波分复用领域, 但由于它们的尺寸一般均在厘米及毫米级, 这就限制了光学回路集成度的提高, 不利于设备的小型化. 由于光子晶体具有与一般晶体相类似的特性^[2], 如光子晶体存在光子禁带和光子缺陷态等, 而且, 在光频范围内, 光子晶体单胞的尺寸一般在亚微米级, 因此, 利用光子晶体制造光频范围的滤波器^[3]引起了科研工作者的关注. 1998年, Shan-hui Fan等人^[4~6]提出了利用光子晶体缺陷态的共振模在两个平行二维光子晶体波导之间实现光信号转移的方法. 符建等人^[7,8]从理论上讨论了利用多微腔、多共振模实现二维平行光子晶体波导间光信号转移的方法. 理论研究表明^[9,10], 通过使用多种介质及多组微腔方法, 可以在二维光子晶体波导间实现对所需要转移的光信号波长的控制, 从而实现多通道光信号的转移. 同时, 利用 Fabry-Pérot 共振腔构成的二维光子晶体滤波器也得到了研究^[11]. 2001年, 一种新的共振转移模式——即利用光子晶体缺陷态的共振模在二维光子晶体波导与垂直方向之间实现光信号的转移——被提出并得到了实验的验证^[12,13]. 同时, 科研人员利用理论及实验方法讨论了在这种模型中, 施主共振模微腔和受主共振模微腔的品质因数特性及椭圆微腔对偏振波的选择特性^[14~17].

在光子晶体滤波器的设计中, 我们需要考虑两

方面的因素; 其一, 需要尽可能地提高共振微腔的品质因数, 以使得被转移信号的波长宽度变窄, 从而更有效地利用光子晶体的波导模. 其二, 我们需要考虑共振模的可调谐性. 在上述的各种光子晶体滤波器中, 主要是通过改变光子晶体共振微腔的半径或改变光子晶体共振微腔的介电常数, 以达到改变微腔共振模波长的目的, 从而实现对不同波长光信号的转移. 由于在光频范围内, 光子晶体滤波器微腔的结构一般在亚微米到纳米级之间, 这使得通过这种方法来实现对共振模波长的调谐较为困难. 而光子晶体制造中对所用材料的要求, 也限制了通过材料介电常数的改变来调谐共振模波长方法的应用.

研究表明^[18]准分形结构光子晶体具有多频带隙的特点, 且带隙的中心频率随着分形结构单元的调整而改变. 这为我们设计光频滤波器开启了一条新的思路. 分形结构单元及其几何形状的多样性以及这种光子晶体多频带隙的特点无疑会为我们设计多通道滤波器带来很大的便利, 因此, 在本文中, 对于这种具有准分形特征的二维光子晶体, 我们利用数值方法讨论了其能带和带隙的频率随分形结构单元几何形状的变化情况.

1 理论

利用 A. J. Ward 和 J. B. Pendry^[19]的 Order-N 计算程序计算光子晶体的能带. 同时, 对于横磁波, 我们使用如下伪周期平面波的初始场分布^[20]

$$\begin{aligned} E(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} \mathbf{e}_0(\mathbf{k} + \mathbf{G}) e^{i(\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot \mathbf{r}}, \mathbf{e}_0(\mathbf{k} + \mathbf{G}) = \\ \mathbf{v} \times (\mathbf{k} + \mathbf{G}), H(\mathbf{r}) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $E(\mathbf{r}), H(\mathbf{r})$ 分别为 \mathbf{r} 处的电场强度及磁场强度矢量, \mathbf{e}_0 为电场平面波的振幅矢量, $E(\mathbf{r}), \mathbf{e}_0$ 矢量的方向均垂直于二维光子晶体的周期面. $\mathbf{v}, \mathbf{k}, \mathbf{G}$ 分别为二维光子晶体周期面内的矢量, 波矢量及倒格子矢量.

* 深圳市科技计划 (批准号: 2002-k1-65) 支持项目
Tel: 0755-26733319 Email: g_yjsh@szu.edu.cn
收稿日期: 2003-12-05

由于光子晶体是一个周期结构,因此,在光子晶体的能带计算中,我们选择光子晶体的一个单胞作为计算区域,在计算区域内,随机选取 200 个点的电磁场量用于能带计算,而在计算区域的边界上采用如下的周期边界条件

$$E(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{R}} E(\mathbf{r}), H(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{R}} H(\mathbf{r}) \quad (2)$$

式中 \mathbf{R} 为二维光子晶体点阵的正格子矢量.

计算中,我们将二维光子晶体的计算区域划分为 90×90 的网格. 频率以 $\omega a / (2\pi c)$ 为单位. 其中 ω 为电磁波的圆频率, a 为计算区域的边长, c 为真空中的光速,时间间隔以秒为单位. 在计算中我们使用了 2^{16} 个时间步,因此光子晶体能带频率轴上的间隔为 0.00275. 同时,对于简约布里渊区中沿 $\Gamma \rightarrow X, \Gamma \rightarrow M, X \rightarrow M$ 方向的波矢,我们将其各分成 20 个等分点进行计算.

2 计算模型、结果及讨论

图 1 表示的是准分形结构光子晶体的模型,它是通过对 Sierpinski 地毯结构进行改造后得到的,其中,白、黑两种颜色代表两种不同的介质材料. 构造过程为:将由白色介质组成的正方形区域 9 等分,去掉中间一个小正方形区域的白色介质,并加入黑色介质. 而后对剩余的 8 个小正方形区域再各自 9 等分,各自去掉中间一个正方形区域的白色介质,并加入黑色介质,由此构成光子晶体的一个单胞. 见图 1(a). 由上述构造过程我们知道,该光子晶体单胞既为 2 级 Sierpinski 地毯结构,我们称其为正方形结构准分形光子晶体. 在上述构造过程中,如果我们去掉的是中间小正方形内切圆区域的白色介质,并加入黑色介质,由此构成的光子晶体,我们称其为内切圆结构准分形光子晶体,见图 1(b). 如果我们去掉的是中间小正方形内切圆的内接正三角形区域的白色介质,并加入黑色介质,由此构成的光子晶体,我们称其为正三角形结构准分形光子晶体,见图 1(c). 由于本文所讨论的光子晶体是由上述晶胞在二维平面上周期排列构成的,因此,我们称这种光子晶体为准分形结构光子晶体.

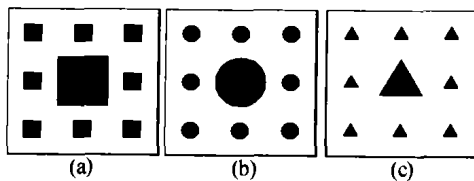


图 1 准分形结构光子晶体模型 1
Fig. 1 Quasi-fractal photonic crystal model 1

图 1 中白色和黑色部分介质的相对介电常数分别为 $\epsilon_1 = 1, \epsilon_2 = 13$.

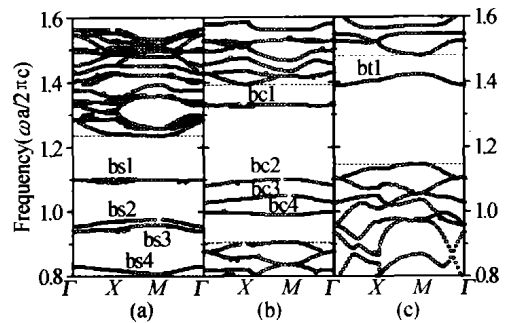


图 2 正方形结构,内切圆结构及正三角形结构能带
Fig. 2 The photonic bands of square, inscribed circle and equilateral triangle structures

由图 2(a)、(b)、(c) 可以看到这种准分形光子晶体多频带隙的特点. 在下面的讨论中,为方便讨论,我们将这里的多个带隙视为在一个带隙内包含有若干导带的情况予以讨论. 同时,这种带隙的取法是为了便于说明带隙内导带的变化情况. 由于在图 2(a)、(b)、(c) 的能带中,频率 0 ~ 0.8 之间的能带变化不大,且我们主要关心的是带隙间导带的变化情况,因此,我们取 0.8 ~ 1.6 频率范围的能带予以讨论.

由图 2(a) 可以看到,在频率分别为 0.8000 及 1.2360 的黑线和短划线之间的带隙中存在有 bs1, bs2, bs3, bs4 四条导带. 而图 2(b) 中,在频率分别为 0.9036 及 1.3925 的两条短划线之间的带隙内同样存在着 bc1, bc2, bc3, bc4 四条导带. 图 2(c) 中,在频率分别为 1.1453 及 1.4804 的两条短划线之间的带隙内存在 bt1 一条导带.

对比图 2 的(a)、(b)、(c),可以发现,随着准分形光子晶体单胞内结构单元几何形状的改变,不但带隙的宽度及导带的数量发生了改变,而且,每条导带均有完全不同的中心频率. 由图 2 我们还可以看到,带隙内的各条导带均有较窄的带宽,且多条导带(如,bs1 和 bc1)对波矢的变化不敏感. 这对滤波器的设计无疑是有利的. 同时,图 2 中短划线所表示的带隙以外能带的变化显示,随着图 1 中相对介电常数 $\epsilon_2 = 13$ 的黑色介质占空比的减小,能带的平均频率在不断的趋向于高频端.

对于图 2 所显示的带隙内导带的中心频率随单胞内结构单元几何形状的改变而变化的行为我们作了进一步的讨论. 计算模型见图 3.

图 3(a)、(b) 两组结构的构成方法是,将图 1 正三角形结构中的等边三角形换作等腰三角形. 其中,对于图 3(a) 中的结构,单胞中间大的等腰三角形的顶角均为 30° ,而单胞周围 8 个小的等腰三角形的顶角自左至右依次为 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$,因此,我们

图 2(a)、(b)、(c) 分别为图 1(a)、(b)、(c) 准分形结构光子晶体横磁波的能带图. 由于光子晶体能带出现带隙需要较大的介电常数比,因此,我们取

分别称其为 3030 结构, 3060 结构及 3090 结构. 对图 3(b) 中的结构, 每个单胞周围的小三角形均为等边三角形, 而中间大的等腰三角形的顶角角度自左至右依次为 30° 、 60° 、 90° , 因此, 我们分别称其为 3060 结构, 6060 结构及 9060 结构. 由图 3 可知, 图 3(b) 与图 3(a) 中的 3060 结构是一样的, 而图 3(b) 中的 6060 结构为图 1(c) 的正三角形结构. 与图 1 中的情况一样, 由图 3(a)、(b) 的构造过程可知, 图 3(a)、(b) 中的两组结构仍是一种准分形结构光子晶体.

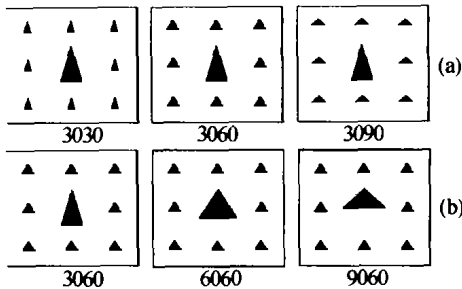


图 3 准分形结构光子晶体模型 2

Fig. 3 Quasi-fractal photonic crystal model 2

由图 3 模型的构造方法可知, 图 3(a) 结构组的特点是: 三个准分形光子晶体单胞中心的介质柱不变, 单胞周围 8 个三角形介质柱的顶角在依次变化. 而图 3(b) 结构组的特点与图 3(a) 的正相反, 即, 三个准分形光子晶体单胞中心介质柱的顶角在依次变化, 单胞周围的 8 个三角形介质柱则保持不变.

图 4(a)、(b)、(c) 分别为图 3(a) 中 3030 结构, 3060 结构及 3090 结构横磁波的能带图. 图 5(a)、(b)、(c) 则分别为图 3(b) 中 3060 结构, 6060 结构及 9060 结构横磁波的能带图. 在这里我们仍然令图 3 中白、黑两种介质的相对介电常数分别为 $\epsilon_1 = 1$, $\epsilon_2 = 13$.

由图 4(a) 可以看到, 在频率分别为 1.1728 及 1.5326 的两条短划线之间的带隙中存在有 b3030_1, b3030_2, b3030_3 三条导带. 导带的中心频率分别为 1.4461, 1.3293, 1.2195, 导带的带宽分别为 0.0467, 0.0549, 0.0604.

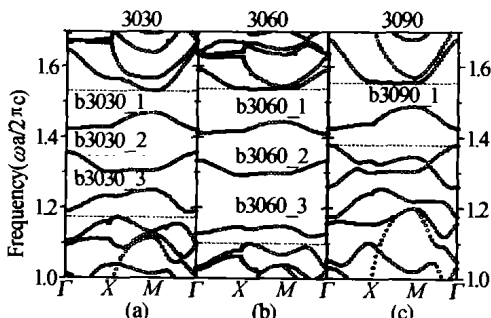


图 4 3030 结构, 3060 结构及 3090 结构能带

Fig. 4 The photonic bands of 3030, 3060 and 3090 structures

在图 4(b) 中, 两条短划线的频率分别为 1.0986 及 1.5381. 它们所表示的带隙中同样存在有 b3060_1, b3060_2, b3060_3 三条导带. 导带的中心频率分别为 1.4282, 1.3129, 1.1343, 导带的带宽分别为 0.0330, 0.0385, 0.0275.

而图 4(c) 中, 在频率分别为 1.3788 及 1.5546 的两条短划线之间的带隙中存在有 b3090_1 一条导带. 导带的中心频率为 1.4571, 导带的带宽为 0.0632.

由于图 5 是图 3(b) 结构组的能带, 而图 3(b) 中的 3060 结构及 6060 结构分别为图 3(a) 中的 3060 结构及图 1(c) 的正三角形结构, 因此, 其能带情况如上所述. 只是为表示方便, 在这里, 我们将图 2(c) 正三角形结构能带图中的 bt1 导带表示成图 5(b) 的 b6060_1 导带, 该导带的中心频率为 1.4063, 导带的带宽为 0.0330. 由图 5(c) 可见, 在频率分别为 1.1453 及 1.5244 的两条短划线之间的带隙中存在有两条导带. 导带的中心频率分别为 1.4845, 1.2662, 导带的带宽分别为 0.0192, 0.0275.

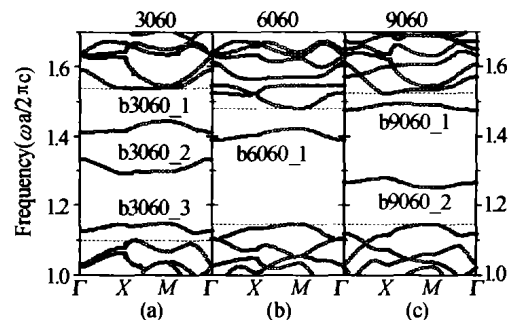


图 5 3060 结构, 6060 结构及 9060 结构能带

Fig. 5 The photonic bands of 3060, 6060 and 9060 structures

由图 4 可以看到, 随着图 3(a) 结构组中 8 个小等腰三角形顶角角度的改变, 与图 2 相同, 不但带隙的宽度及带隙内导带的数量发生了改变, 且各导带具有不同的中心频率. 图 5 的能带也具有与图 4 相同的特点, 即通过调整单胞内结构单元的几何形状可以改变带隙的宽度及带隙内导带的数量和中心频率.

对比图 4, 图 5 可以发现, 图 5 中导带的带宽较图 4 的要小, 与图 4 相比, 对波矢的变化不敏感. 而通过对比图 2, 图 4, 图 5 可以发现, 在准分形结构光子晶体单胞内, 结构单元的对称性越高, 则其带隙内导带的带宽就越窄, 对波矢变化的敏感性就越低.

同时, 对比图 4 中导带 b3030_1, b3060_1, b3090_1 及导带 b3030_2 和 b3060_2, 我们可以发现, 随着图 3(a) 中小等腰三角形顶角角度的变化, 其导带的中心频率只有微小的调整. 而将图 5 中导带 b3060_1, b6060_1, b9060_1 之间的中心频率差与图 4 中导带 b3030_1, b3060_1, b3090_1 之间的中心

频率差作对比,可以发现,前者的中心频率差要大于后者的中心频率差. 对比图 5 中导带 b3060_2, b9060_2 与图 4 中导带 b3030_2, b3060_2 之间的中心频率差也可以得到相同的结论. 这表明图 3(b) 的准分形光子晶体单胞中心大的三角形柱的角度变化对导带频率的调谐能力要比小的三角形柱强. 由此,我们可以将这种准分形光子晶体单胞中心大的三角形柱作为导带频率的主调谐器,而将单胞周围的小三角形柱作为导带频率的微调谐器,从而对导带频率做更精细的调谐. 准分形光子晶体的这一特性使得我们对导带频率的调谐变得更加方便也更加细致,因此,这种准分形结构光子晶体在光频滤波器方面会有良好的应用前景.

对于图 4 及图 5 能带的变化,利用能带平均频率与图 3 中黑色介质占空比的关系^[21],我们可以给出一个定性的解释.

图 6 表示的是图 3 中黑色介质的占空比随等腰三角形顶角角度变化的理论曲线. 其中,点线表示的是图 3(a) 结构组中黑色介质的占空比随单胞周围 8 个小介质柱顶角角度变化的情况. 而实线表示的是图 3(b) 结构组中黑色介质的占空比随单胞中心大介质柱顶角角度变化的情况.

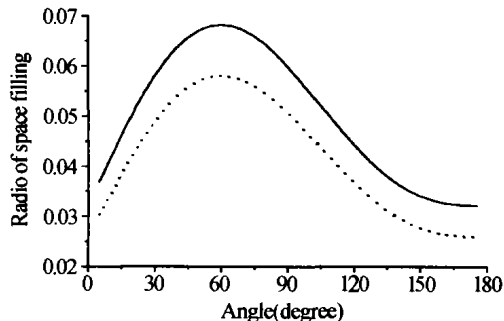


图 6 黑色介质占空比随三角形顶角角度的变化曲线
Fig. 6 The space filling ratio varies with the angle of the triangle structure

由图 6 可以看出,当顶角角度为 60° 时,两条曲线均达到峰值. 因此,图 3(a) 结构组中 3060 结构的占空比要大于 3030 结构和 3090 结构的占空比,而图 3(b) 结构组中 6060 结构的占空比要大于 3060 结构和 9060 结构的占空比. 表现在图 4 及图 5 的能带中,即 3060 结构能带的平均频率要低于 3030 及 3090 结构能带的平均频率;而 6060 结构能带的平均频率要低于 3060 及 9060 结构能带的平均频率. 这一点通过图 4,图 5 中两条短划线以外能带的变化可以较清楚的观察到.

对比图 6 中 30° 与 60° 点曲线的变化量我们可以发现,实线所表示的占空比在 30° 到 60° 之间的变化量要大于点线所表示的占空比在同样范围的变化量. 而对比 90° 与 60° 之间曲线的变化量可以得到

同样的结论,即,在这一区间内,实线的变化量要大于点线的变化量. 表现在对能带频率的调节上,即为准分形光子晶体单胞中大的三角形柱顶角的变化对导带频率的调节能力要大于小的三角形柱.

另外,对图 3(a)、(b) 结构能带的计算表明,当以三角形的外心为轴对这种准分形光子晶体的结构单元做转动时,图 3(b) 中 6060 结构(即图 1(c) 的正三角形结构)单元的转动对能带的影响很小,而对其它结构,如 3030 结构,3090 结构的计算表明,结构单元的转动对其能带有较大的影响. 这说明光子晶体能带的形成不仅受到单胞内介质占空比的影响,而且也受到结构对称性的影响.

3 结论

对多种准分形结构光子晶体能带的数值研究表明,准分形结构光子晶体具有多频带隙的特点. 在将这里的多个带隙视为在一个带隙内包含有若干导带的情况下,计算表明,这种准分形结构光子晶体带隙的宽度及中心频率以及带隙内导带数量和中心频率会随光子晶体单胞内结构单元几何形状的改变而改变. 由于几何形状变化的多样性,这对于设计可调频滤波器会带来较大的方便. 这种准分形结构光子晶体除可在波分复用器件中用于信号的上传和下载外,也可在发光器件,光敏传感器以及天线等领域中获得较广泛的应用.

参考文献

- Hibino Y. Passive optical devices for photonic networks. *IEICE Trans Commun*, 2000, **E83-B**(10): 2178 ~ 2190
- 欧阳征彪,李景镇,张道中. 一维和二维系统中电子禁带与光子禁带的数学等价特性. *光子学报*, 2002, **31**(7): 802 ~ 806
Ouyang Z B, Li J Z, Zhang D Z. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7): 802 ~ 806
- 安丽萍,刘念华. 一维光子晶体中多缺陷耦合导致的杂质带. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1083 ~ 1085
An L P, Liu N H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1083 ~ 1085
- 欧阳征彪,刘海山,李景镇. 光子晶体超窄带滤波器. *光子学报*, 2002, **31**(3): 281 ~ 284
Ouyang Z B, Liu H S, Li J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3): 281 ~ 284
- Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, et al. Channel drop tunneling through localized states. *Phys Rev Lett*, 1998, **80**(5): 960 ~ 963
- Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, et al. Theoretical analysis of channel drop tunneling processes. *Phys Rev B*, 1999, **59**(24): 15882 ~ 15892
- Khan M J, Manolatu C, Fan S H, et al. Mode-coupling

- analysis of multipole symmetric resonant Add/Drop filters. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, **35**(10): 1451 ~ 1460
- 8 Fu J, He S L. Analysis of higher order channel dropping tunneling processes in photonic crystals. *Chin Phys Lett*, 2000, **17**(10): 737 ~ 739
- 9 Fu J, He S L, Xiao S S. Analysis of channel-dropping tunnelling processes in photonic crystals with multiple vertical multi-mode cavities. *J Phys A: (Math. Gen.)*, 2000, **33**(43): 7761 ~ 7770
- 10 Sharkawy A, Shi S Y, Prather D W. Multichannel wavelength division multiplexing with photonic crystals. *Applied Optics*, 2001, **40**(14): 2247 ~ 2252
- 11 Qiu M, Jaskorzynska B. Design of a channel drop filter in a two-dimensional triangular photonic crystal. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(6): 1074 ~ 1076
- 12 Chutinan A, Mochizuki M, Imada M, et al. Surface-emitting channel drop filters using single defects in two-dimensional photonic crystal slabs. *Appl Phys Lett*, 2001, **79**(17): 2690 ~ 2692
- 13 Imada M, Noda S, Chutinan A, et al. Channel drop filter using a single defect in a 2-D photonic crystal slab waveguide. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(5): 873 ~ 878
- 14 Akahane Y, Mochizuki M, Asano T, et al. Design of a channel drop filter by using a donor-type cavity with high-quality factor in a two-dimensional photonic crystal slab. *Appl Phys Lett*, 2003, **82**(9): 1341 ~ 1343
- 15 Akahane Y, Asano T, Song B S, et al. Investigation of high-*Q* channel drop filters using donor-type defects in two-dimensional photonic crystal slabs. *Appl Phys Lett*, 2003, **83**(8): 1512 ~ 1514
- 16 Asano T, Song B S, Tanaka Y, et al. Investigation of a channel-add/drop-filtering device using acceptor-type point defects in a two-dimensional photonic-crystal slab. *Appl Phys Lett*, 2003, **83**(3): 407 ~ 409
- 17 Asano T, Mochizuki M, Noda S, et al. A channel drop filter using a single defect in a 2-D photonic crystal slab-defect engineering with respect to polarization mode and ratio of emissions from upper and lower sides. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(5): 1370 ~ 1376
- 18 付云起, 张国华, 袁乃昌. 具有分形特征的PBG微带线. *电子学报*, 2002, **30**(6): 913 ~ 915
Fu Y Q, Zhang G H, Yuan N C. *Acta Electronica Sinica*, 2002, **30**(6): 913 ~ 915
- 19 Ward A J, Pendry J B. A program for calculating photonic band structures, Green's functions and transmission/reflection coefficients using a non-orthogonal FDTD method. *Computer Physics Communications*, 2000, **128**(3): 590 ~ 621
- 20 Chan C T, Yu Q L, Ho K M. Order-N spectral method for electromagnetic waves. *Phys Rev B*, 1995, **51**(23): 16635 ~ 16642
- 21 Liu Z, Xu J J, Lin Z F. Photonic band gaps in two-dimensional crystals with fractal structure. *Chin Phys Lett*, 2003, **20**(4): 516 ~ 518

The Multi-Stopband Characteristic of Quasi-Fractal Photonic Crystal and its Application

Li Yan^{1,2,3}, Zheng Ruisheng³, Feng Yuchun³, Niu Hanben^{1,3}

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Shaanxi, Xi'an 710068

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864

³ Key Laboratory of Optoelectronic Device and System Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Guangdong Province 518060

Received date: 2003-12-05

Abstract The photonic band of kinds of quasi-fractal photonic crystal is calculated by finite-difference time-domain method. The results show that there are multi-stopband characteristics with the quasi-fractal photonic crystal. As we treat these photonic band gaps as one photonic band gap with several conduction bands in it, the width and center frequency of the photonic band gap, and also the center frequency of the conduction bands in the photonic band gap vary with changing the structure of the unit cell of the quasi-fractal photonic crystal.

Keywords Photonic crystal; Photonic band gap; Fractal; Filter



Li Yan was born in October 1967. He got his B. S. (Physics) and M. S. (Physics) degrees from Northwest University in 1989 and in 1996, respectively. Now he is a PH. D. candidate in the Joint Laboratory of Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics of CAS and Institute of Optoelectronics, Shenzhen University. His current research interest is the photonic crystal.