

文章编号: 1673-9620 (2007) 02-0050-04

准周期性对光子晶体缺陷模的影响^{*}

沈小明, 陈宪锋, 倪重文, 王旭东, 是度芳

(江苏工业学院 信息科学系, 江苏 常州 213164)

摘要: 利用传输矩阵法研究了 Bragg 镜的准周期性对光子晶体缺陷模的影响。研究表明, 无论是高折射率介质层还是低折射率介质层, 当其折射率或厚度按一定的递变规律递增时, 缺陷模都将向低频方向移动, 递减时则向高频方向移动。但对缺陷模品质因子的影响却不同, 高折射率介质层的折射率递增时品质因子提高, 递减时品质因子减小; 但低折射率介质层的折射率递变时品质因子的变化规律刚好相反; 而介质层厚度的递变几乎不影响品质因子。此外还研究了准周期性对缺陷层内电场增强效应的影响。

关键词: 光子晶体; 准周期性; 缺陷模; 品质因子

中图分类号: O 472 **文献标识码:** A

Effects of Quasi-Periodicity on Photonic Crystal Defect Modes

SHEN Xiao-ming, CHEN Xian-feng, NI Chong-wen, WANG Xu-dong, SHI Du-fang

(Department of Information Science, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China)

Abstract: By using the transfer matrix method, the effects of Bragg-mirror quasi-periodicity on the photonic crystal defect mode was studied. Investigations reveal that, for both high and low refractive-index dielectric layers, the defect mode always shifts in the direction of low frequency with the refractive index or thickness increasing gradually. However, the quality factor of the defect mode is affected in a different way by the quasi-periodicity. When the refractive index of the high refractive-index layer increases or decreases gradually the quality factor is correspondingly upgraded or lowered, but for the low refractive-index layer gradual change of the refractive index affects the quality factor in a reversed way, nevertheless gradual change of the layer thickness has almost no influence on the quality factor. Furthermore influence of the quasi-periodicity on the electric field enhancement effect inside the defect layer was also studied, which is similar to that on the quality factor.

Key words: photonic crystal; quasi-periodicity; defect mode; quality factor

近年来, 光子晶体的研究非常活跃。光子晶体最根本的特征是具有光子带隙, 落在带隙中的电磁波被禁止传播。这一特性有着重要的应用, 如光子晶体光纤^[1]、光子晶体波导^[2]、全向反射镜^[3]、光子晶体滤波器^[4]、光子晶体偏振器^[5]等。在光子晶体中引入缺陷, 可使光子局域化。利用掺杂光

子晶体来抑制或增强自发辐射, 制造高效率 and 零阈值的激光器^[6]、高品质的激光谐振腔^[7]、以及高效发光二极管^[8]等。尤其是引入非线性介质还可以使系统在光学响应中出现双稳态^[9]、多稳态及光学限制^[10]等特性。因此研究缺陷层对光子晶体能带结构的影响, 了解缺陷模的有关特性, 对于光

* 收稿日期: 2006-06-20

作者简介: 沈小明 (1963-), 男, 江苏宜兴人, 讲师, 主要从事光学材料及理论研究。

子晶体的制作和应用很有帮助。

有缺陷的光子晶体,也可以把它看作一个由 Bragg 镜组成的 Bragg 腔。对于有缺陷层的一维光子晶体的缺陷模特性,目前已有一些相关的报道^[11~13],但他们的工作主要集中在 Bragg 镜是由周期性的介质板交替排列组成,亦即是一个周期性的光子晶体。目前对于 Bragg 镜具有准周期结构的研究鲜有报道,而准周期结构对于拓展光子晶体的应用很有价值。因此作者研究了 Bragg 镜的准周期性对光子晶体缺陷模的影响,以期取得新的应用。

1 晶体模型

带缺陷的光子晶体的结构如图 1 所示。缺陷层两侧利用两个对称的光子晶体 $(AB)^N$ 来作为 Bragg 镜,其中介质 A 为 ZnS, $n_{A0}=2.35$ 、 $d_{A0}=0.165 \mu\text{m}$, 介质 B 为 MgF_2 , $n_{B0}=1.38$ 、 $d_{B0}=0.281 \mu\text{m}$ 。缺陷层 D 的折射率 $n=2.35$, 厚度为 $d=\frac{\lambda_0}{4n} \times m$ (m 为无量纲数)。参考波长 $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$, 该光子晶体结构简写为 $(AB)^N D^m (BA)^N$ 。

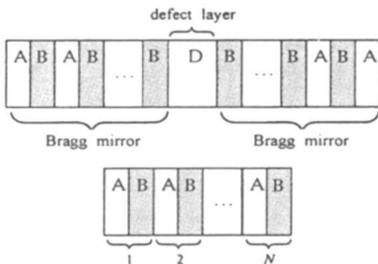
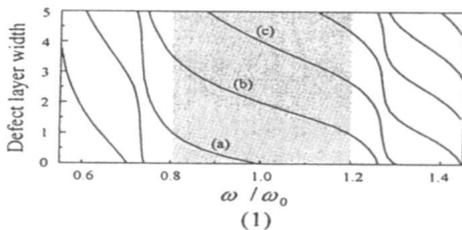


图 1 光子晶体的结构示意图

Fig 1 Diagram of photonic crystal structure



(1) Variance of frequency (at $T=1$) with defect layer thickness

现改变两侧 Bragg 镜的周期性,使其折射率按一定的规律发生变化, A 层的折射率变化规律为 $n_{Ai}=n_{A0} [1+(i-1)\Delta_1]$, 或改变 B 层的折射率 $n_{Bi}=n_{B0} [1+(i-1)\Delta_2]$ 。作为比较作者还改变了 A 层的厚度 $d_{Ai}=d_{A0} [1+(i-1)\Delta_3]$ 。上述 3 种递变规律中变量 i 的范围为 $1 \leq i \leq N$, Δ_1 、 Δ_2 和 Δ_3 分别表示 3 种递变规律的递变量,它们取零值即为理想结构 $(AB)^N D^m (BA)^N$ 。

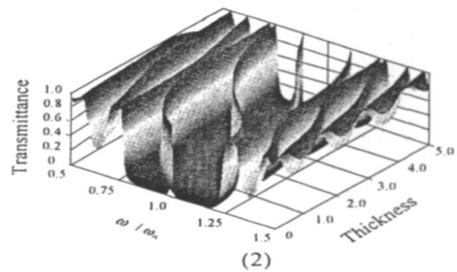
讨论入射光垂直晶体入射,利用传输矩阵算法^[14]计算该带有缺陷层的光子晶体的透射谱。

2 结果与讨论

对于周期性的 Bragg 镜,光子晶体透射率取极大值 ($T=1$) 时的入射光频率与缺陷层厚度 d 有关,图 2 给出了理想结构 $(AB)^4 D^m (BA)^4$ 的透射谱。在图 2 (1) 中,阴影部分为理想结构 $(AB)^4 D^m (BA)^4$ 的禁带区域。当缺陷层的厚度 $d=\frac{\lambda_0}{4n} \times m$, $m=1$ 时,禁带中没有缺陷模的存在,但当厚度 d 取其他值时,禁带中都会出现缺陷模。而且缺陷模随着厚度 d 的增加向低频(长波)方向移动,图 2 (2) 绘出了变化的三维图。

根据固体电子的能带理论,对图 2 禁带中的缺陷模可以冠以相应的称谓^[15],如曲线 (a) 称为受主模,曲线 (b) 称为第一施主模,曲线 (c) 称为第二施主模等。本文着重研究准周期结构的 Bragg 镜对第一施主模的影响。

2.1 对缺陷模频率的影响



(2) 3D transmission spectrum

图 2 光子晶体 $(AB)^4 D^m (BA)^4$ 的透射谱

Fig 2 Transmission spectra of photonic crystal $(AB)^4 D^m (BA)^4$

图 3 给出了准周期性 Bragg 镜对光子晶体 $(AB)^4 D^m (BA)^4$ 第一施主模的影响。其中图 3 (a)、(b)、(c) 分别表示 Bragg 镜的 A 层折射率、

B 层折射率、及 A 层介质厚度发生递变时第一施主模变化。可以发现,当这 3 种递变量发生变化时,第一施主模的变化有一个共同的趋势。当递变量

(Δ_1 、 Δ_2 、或 Δ_3) 为正值时, 施主模向低频方向移动, 递变量越大移动的幅度亦越大; 当递变量为负值时, 施主模则向高频方向移动。

结合图 3, 还可以发现 A 层的折射率递变或厚度递变时第一施主模的变化基本相同, 差异较小; 而 B 层折射率递变时施主模的变化与之有着明显的差异, 靠近价带部分移动量小而靠近导带区移动量大。

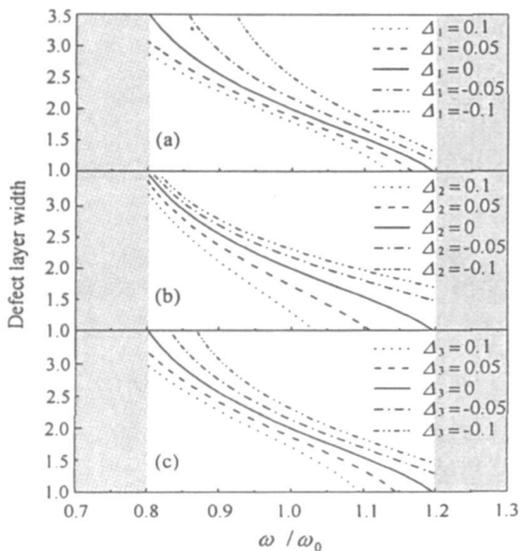


图 3 准周期性 Bragg 镜对第一条施主模的影响

Fig 3 Effects of the Bragg-mirror quasi-periodicity on the first donor mode

2.2 对缺陷模品质因子的影响

品质因子 Q 是评价微腔的一个重要物理量。

Q 定义为 $Q = \frac{\omega}{\Delta\omega_{1/2}}$, 其中 ω 为共振频率, 亦即缺陷模频率, 而 $\Delta\omega_{1/2}$ 为缺陷模的带宽 (FWHM)。第一施主模的品质因子随缺陷层厚度的变化关系如图 4 所示, 在图中亦同时给出了 Bragg 镜的准周期性对品质因子的影响。

可以发现, 当缺陷层的光学厚度为半波长时, 缺陷模的品质因子最大。实际上, 当缺陷层的光学厚度为半波长的整数倍时, 缺陷模的频率位于禁带正中间, 即在参考频率 ω_0 处 (这从图 2 可以明显看出), 由于满足 F-P 腔的共振条件, 这时缺陷模高度局域, 谱线宽度最窄。随着缺陷层厚度的变化, 缺陷模频率发生移动, Bragg 镜对其的反射能力有所下降 (但还是接近 1), 使得缺陷模的线宽逐渐增大, 导致品质因子逐渐降低。

从图 4 中还可以发现 Bragg 镜的准周期性对品

质因子的影响。当 A 层 (高折射率层) 折射率递增时, 缺陷模的品质因子有了明显的提高, 而折射率递减时品质因子则减小, 见图 4 (a)。对于 B 层 (低折射率层) 折射率递变时, 图 4 (b) 则给出了奇异的现象: 当缺陷层的光学厚度小于 $3\lambda_0/8$ 时品质因子的变化趋势类似上述情形; 但当光学厚度超过这一值时, B 层的折射率递增时缺陷模的品质因子反而减小, 而当折射率递减时品质因子却增大。图 4 (c) 则说明介质层的厚度发生递变时几乎不改变缺陷模的品质因子。

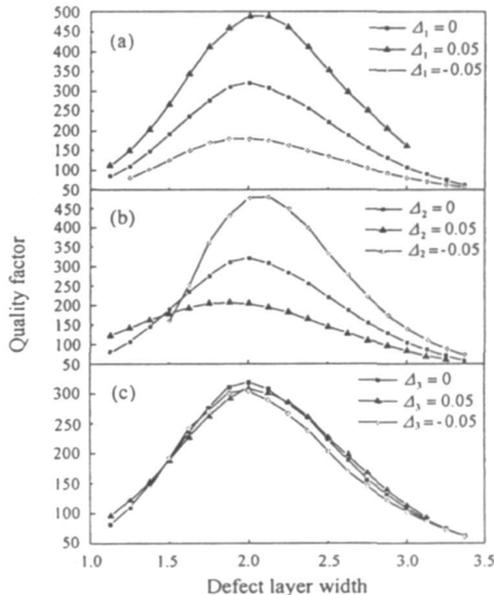


图 4 缺陷层厚度对缺陷模品质因子的影响

Fig 4 Effects of the defect layer thickness on the quality factor

2.3 对缺陷层内电场强度的影响

众所周知, 以缺陷模频率传播的光将被强烈地局域在缺陷层内, 通过界面的多次反射相互干涉得以加强。如果将缺陷模作为激发模, 将激活介质置于最大场强处, 则激活介质的增益系数将急剧提高, 因此了解缺陷层内的场强很有必要。

图 5 给出了缺陷层内电场强度振幅平方的增强因子 G 随缺陷层厚度的变化关系。增强因子 G 定义为 $G = |E_d|_{\max}^2 / |E_i|^2$, E_d 为缺陷层内电场强度, E_i 为入射光场强。此外, 在图 5 中亦给出了 Bragg 镜的准周期性对增强因子的影响。从中可以发现当缺陷层的厚度满足 F-P 腔的共振条件时缺陷层内的电场强度最强, 而当缺陷层的厚度偏离该值时层内电场迅速下降。Bragg 镜的 A 层折射率递增时, 缺陷层内的电场强度还将进一步加强, 而折射率递减时电场强度的增强效应将减弱。该图的变

化规律同图 4 (a) 完全一致, 两者仅仅是数值上不同而已, 有关这方面的共性关系将另文发表。同样计算表明 B 层折射率递变时的规律亦相似于图 4 (b)。

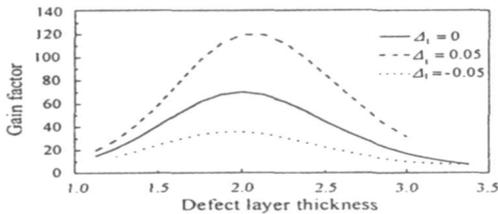


图 5 缺陷层厚度对增强因子的影响

Fig 5 Effects of the defect layer thickness on the gain factor

3 结 论

研究了 Bragg 镜的准周期性对光子晶体缺陷模的影响。发现无论是 Bragg 镜的高折射率介质层还是低折射率介质层, 当其折射率或厚度按一定的递变规律递增时, 相对于周期性的 Bragg 镜而言缺陷模都将向低频方向移动, 而递减时缺陷模则向高频方向移动。对于缺陷模品质因子的影响有着不同的规律, 高折射率介质层的折射率递增时品质因子提高, 递减时品质因子减小; 但低折射率介质层的折射率递变时品质因子的变化规律与之相反; 介质层厚度的递变几乎不影响品质因子。当缺陷层的光学厚度为半波长的整数倍时, 缺陷模的品质因子最大。此外还研究了准周期性对缺陷层内电场增强效应的影响, 其变化规律类似于品质因子的变化规律。

参考文献:

[1] Knight J C, Braks T A, Russell P St J, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt Lett*, 1996, 21 (19): 1 547-1 549.

[2] Yariv A. Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis [J]. *Opt Lett*, 1999, 24 (11): 711-713.

[3] Fink Y, Winn J N, Fan S, et al. A dielectric omnidirectional reflector [J]. *Science*, 1998, 282: 1 679-1 682.

[4] Gupta S, Tuttle G. Infrared filters using metallic photonic band gap structures on flexible substrate [J]. *Appl Phys Lett*, 1997, 71 (17): 2 412-2 414.

[5] Neda S, Yogyama M, Imada M, et al. Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design [J]. *Science*, 2001, 293: 1 123-1 125.

[6] Yakoyama H, Nishi K, Anan T, et al. Controlling spontaneous emission and threshold-less laser oscillation with optical microcavities [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1992, 24 (2): s245-s272.

[7] Villeneuve P R, Fan S, Joannopoulos J D. Microcavities in photonic crystals: mode symmetry, tenability, and coupling efficiency [J]. *Phys Rev B*, 1996, 54 (11): 7 837-7 842.

[8] Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, et al. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 78 (17): 3 294-3 297.

[9] Lidorilis E, Busch K, Li Q M, et al. Optical nonlinear response of a single nonlinear dielectric layer sandwiched between two linear dielectric structure [J]. *Phys Rev B*, 1997, 56 (23): 15 090-15 099.

[10] Ohn S, Akozbek N. Nonlinear optical solitary waves in a photonic band gap [J]. *Phys Rev Lett*, 1993, 71 (8): 1 168-1 171.

[11] Stanley R P, Houdrie R, Oesterle U, et al. Impurity modes in one-dimensional periodic systems: The transition from photonic band gaps to microcavities [J]. *Phys Rev A*, 1993, 48 (3): 2 246-2 250.

[12] Tsai Y C, Shung K W K, Gou S C. Impurity modes in one-dimensional photonic crystals analytic approach [J]. *J Mod Opt*, 1998, 45 (10): 2 147-2 157.

[13] Chen X, Shen X, Jiang M, et al. Studies on the defect mode properties of 1D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34 (12): 1 876-1 880.

[14] Jiang M P, Jiang X F, Shen X M, et al. Study on the polarization property of 1D photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22 (4): 612-616.

[15] Yablonovitch E, Gmitter T J, Meade R D, et al. Donor and acceptor modes in photonic band-structure [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, 67 (24): 3 380-3 383.