

光子晶体滤波特性分析*

朱志宏 叶卫民 季家熔 袁晓东 曾淳 张晚云

(国防科技大学理学院光子声子研究中心,长沙 410073)

摘要 采用时域有限差分(FDTD)方法,研究光在含点缺陷(即微腔)和线缺陷(即波导)的光子晶体中的传输特性. 计算结果表明,处于光子晶体禁带的光能被局域在光子晶体波导中传输. 而具有特定本征共振频率的光子晶体微腔可将在其附近波导中传播的相应频率成份的光下载到微腔中,不同结构的腔可以“下载”不同频率成份的波. 以上计算结果,可用于光子晶体上/下载滤波器的设计.

关键词 光子晶体;时域有限差分(FDTD);波导;微腔;滤波

中图分类号 O734 **文献标识码** A

0 引言

在过去的几年中,光子晶体(photonic crystals)^[1,2]因其具有控制光子的流动的能力而备受关注^[3,4]. 它其实就是一种周期性电介质. 在周期性电介质材料中,光的色散曲线明显地不同于均匀电介质中的光的色散曲线,其中存在类似于半导体禁带的“光子禁带”(photonic band gap)^[5-10];频率在禁带范围内的光,不能在介质中传播. 光子晶体的非凡本领正是由于这个禁带的存在. 当在光子晶体中引入线缺陷后,处于原来对完整光子晶体不透明的禁带中的光可以沿着线缺陷传播,这就形成了光子晶体波导. 当在光子晶体中引入点缺陷后,由于这些点缺陷对原有的空间对称性产生微扰,形成一个微腔,并且微腔有自己的共振频率. 在一定条件下,光子晶体波导和微腔会发生耦合,波导中频率在微腔共振频率附近的光波的能量能被“下载”到了微腔里面,也即是光子晶体有滤波特性.

本文用时域有限差分方法(FDTD)^[11-13]作为研究工具,以二维方型光子晶体TM模($E = E_k, H = H_x i + H_y j, k$ 为平行于介质柱轴方向的单位矢量)为研究对象,给出了一些模拟计算结果.

1 结果与分析

对于如图1(a)所示的二维线缺陷方型光子晶体:晶格常数为 a ,基质为空气,介质柱半径为 r ,介电常数为 ϵ ;取 $r = 0.25a$,介质柱的相对介电常数为4.55. 当TM模局域脉冲源(源函数时变部分为 $e^{-\frac{(t-t_0)^2}{T^2}} \sin(2\pi f_0 t)$,计算中取 $t_0 = 50\Delta t, T = 20\Delta t, \Delta t$

为时间步长 f_0 归一化频率0.40, 归一化频率方法: $\omega a/2\pi c$ 沿图中箭头位置和方向入射到光子晶体上时,用FDTD方法可以得到A处的透射率频率分布如图1(b)中的“data 1”所示.“data 3”与“data 2”是拿掉光子晶体后,相同的局域源在空气中传播时,在A处和整个出射面的透射率. 从图中可以看出,如果光的频率在光子晶体禁带范围之外,则不管是在光子晶体波导中还是空气中,散射(或衍射)都很厉害,以至到达A处的能量只是很少的一部分;当光的频率(归一化频率0.358-0.47之间)在光子晶体禁带范围之内时,在光子晶体中,光波只能沿着线缺陷传播,能量集中到达A处.

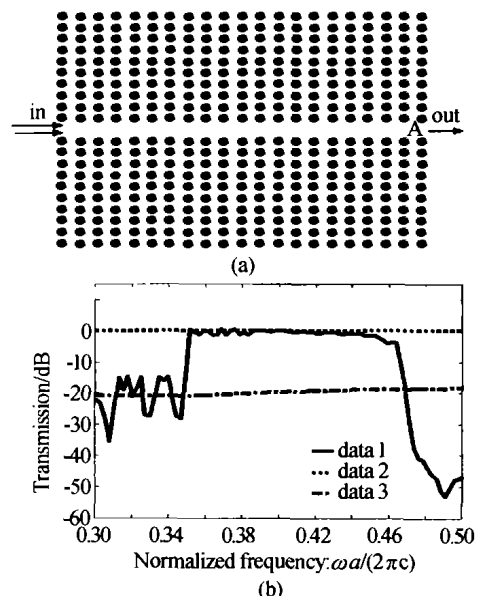


图1 (a)包含线缺陷的二维方型光子晶体俯视图(20 × 20周期);(b)A处透射率频率分布

Fig. 1 (a) The top view of a 2D square lattice photonic crystal with line defect(20 × 20); (b) Transmitted power vs normalized frequency about A

在图1(a)所示的光子晶体中,拿掉一个介质柱,形成一个既包含线缺陷又包含点缺陷的光子晶体,其俯视图如图2(a)所示,这时得到的B处C点

*973 国防安全重大基础研究项目基金资助
Tel:13786143419 Email:wexzzh@163.com
收稿日期:2003-06-16

的透射率频率分布和电场振幅频率分布如图 3. 对比图 1(b) 和图 3, 可以看出: 脉冲中频率约为 0.425 的光波的能量被“下载”到了点缺陷里面; 这是因为点缺陷所形成的微腔和线缺陷中的频率为 0.425 的光波发生共振, 将其能量耦合到了点缺陷中; 由此也可知这个微腔存在 0.425 的共振频率.

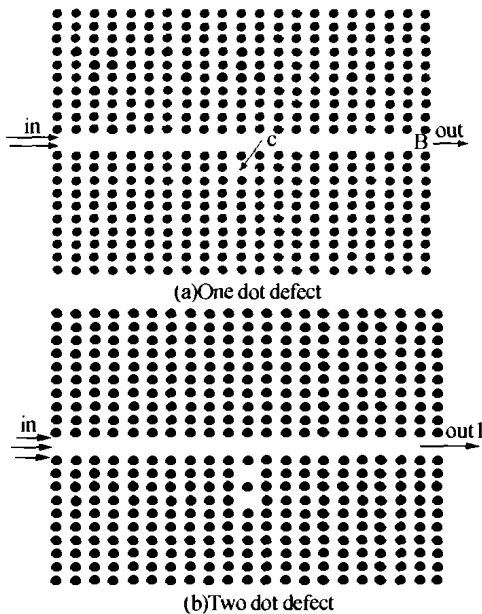


图 2 包含线缺陷点缺陷的二维方型光子晶体俯视图
Fig. 2 The top view of a 2D square lattice photonic crystal with line defect and dot defect (20 × 20)

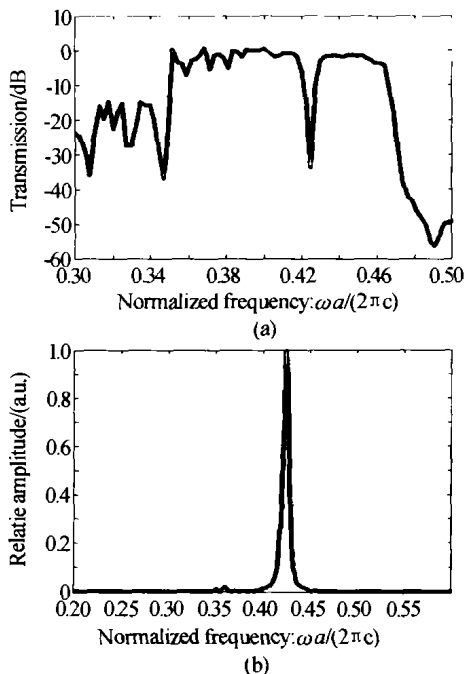


图 3 (a) 图 2(a) 中 B 处透射率频率分布; (b) 图 2(a) 中 C 点电场振幅频率分布
Fig. 3 (a) Transmitted power vs normalized frequency about B of Fig. 2(a); (b) Amplitude of electric field vs normalized frequency of dot C of Fig. 2(a)

在图 1(a) 所示的光子晶体中, 拿掉两个介质柱, 形成一个既包含线缺陷又包含两个点缺陷的光子晶体, 其俯视图如图 2(b) 所示, 这时得到的波导出口的透射率频率分布如图 4 所示. 对比图 4 和图

1(b), 可以看出: 脉冲中频率约为 0.409 和 0.437 的光波的能量被耦合到了点缺陷里面; 这时可以知道: 由两个点缺陷所形成的微腔存在 0.409 和 0.437 两个共振频率.

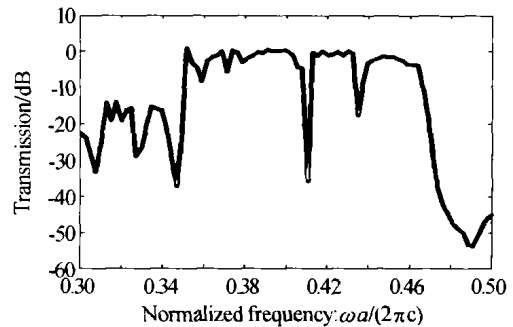


图 4 图 2(b) 透射率幅频率分布
Fig. 4 Transmitted power vs normalized frequency of Fig. 2 (b)

前面部分的结果表明, 光子晶体点缺陷形成的微腔存在共振频率; 在共振频率处, 微腔和附近的波导的耦合最强, 波导中频率在微腔共振频率附近的光波的能量能被“下载”到了微腔里面. 不难理解, 如果能将“下载”到微腔中的能量耦合出来, 那将是一件很有意义的事情.

设计如图 5(a) 所示的结构, 就可以将图 2(b) 中“下载”到微腔中的 2 个窄频信号 (对应频率为 0.409 和 0.437) 提取出来, 如图 5(b) 所示.

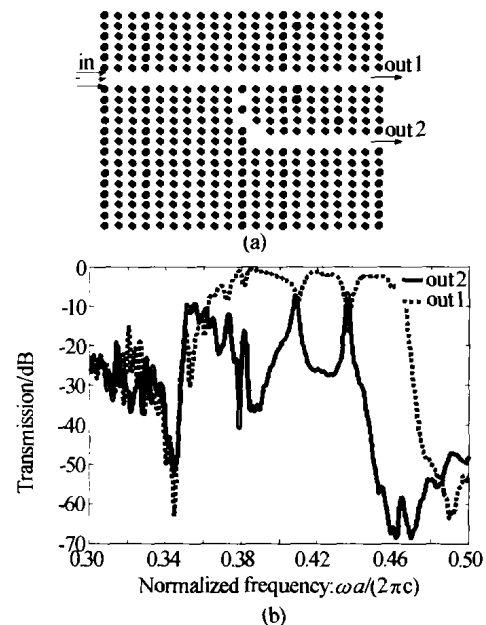


图 5 (a) 包含线缺陷点缺陷的二维方型光子晶体俯视图 (20 × 20 周期); (b) 波导出口透射率频率分布
Fig. 5 (a) The top view of a 2D square lattice photonic crystal with line defect and dot defect (20 × 20); (b) Transmitted power Vs normalized frequency

用图 2 所示的点缺陷微腔来“下载”信号, 最多只能得到与微腔共振频率个数相等的有限几个窄频信号; 为了能得到更多的窄频信号, 可以考虑用环形波导腔或环形耦合腔波导来代替微腔, 如图 6(a) 和图 7(a) 所示. 从图 6(b) 和图 7(b) 可以看出, 的确有更多的窄频信号出现. 我们的计算结果表明: 如

果要保持环形腔的独立性(高 Q 值)使得被“下载”下来的窄频信号频宽更窄,必须让环形腔离直波导尽量远;如果要使“下载”效率更高,必须让环形腔离直波导尽量近;于是,需要根据实际需要平衡选择.

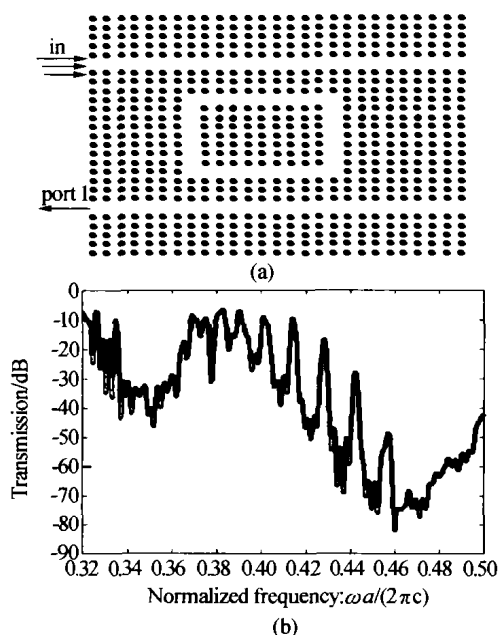


图6 (a)包含线缺陷的二维方型光子晶体俯视图(27×27 周期);(b)波导出口透射率频率分布

Fig. 6 (a) The top view of a 2D square lattice photonic crystal with a closed line defect (27×27); (b) Transmitted power Vs normalized frequency

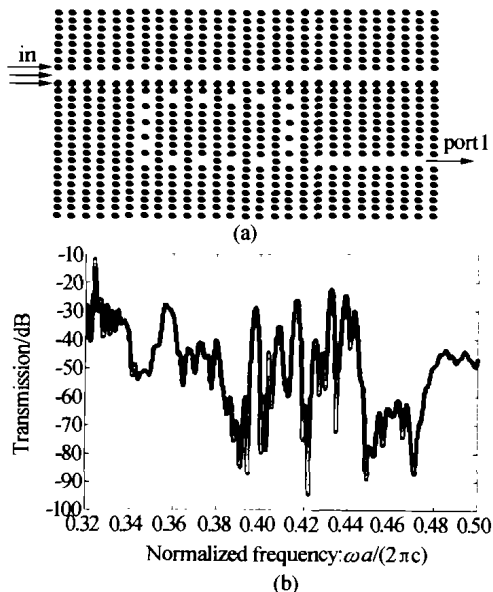


图7 (a)包含线缺陷点缺陷的二维方型光子晶体俯视图(27×27 周期);(b)波导出口透射率频率分布

Fig. 7 (a) The top view of a 2D square lattice photonic crystal with line defect and dot defect (27×27); (b) Transmitted power vs normalized frequency

2 结论

将时域有限差分法(FDTD)用于光子晶体滤波特性研究,以二维方型光子晶体TM模为研究对象;

结果表明:在共振频率处,微腔和附近的波导耦合最强,波导中频率在微腔共振频率附近的光波的能量能被“下载”到了微腔里面,不同结构的腔,“下载”的波的频率不同.进一步地研究表明,设计一定的结构,能将“下载”到微腔中的能量耦合出来.

参考文献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059 ~ 2062
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2486 ~ 2489
- 3 Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N. Photonic Crystals: Molding the flow of light. Princeton University Press, 1995. 212 ~ 319
- 4 Mekis A. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides. *Phys Rev Lett*, 1996, **77**(18): 3787 ~ 3790
- 5 Joannopoulos J D, Villeneuve P R, Fan S. Photonic crystals: putting a new twist on light. *Nature*, 1997, **386**(6621): 143 ~ 149
- 6 Abram I, Bourdon G. Photonic-well microcavities for spontaneous emission control. *Phys Rev (A)*, 1996, **54**(8): 3476 ~ 3479
- 7 Ho K M, Chan C T, Soukoulis C M. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures. *Phys Rev Lett*, 1990, **65**(25): 3152 ~ 3155
- 8 Sigalas M M, Chan C T, Ho K M. *et al.* Metallic photonic band-gap materials. *Phys Rev (B)*, 1995, **52**(10): 11744 ~ 11751
- 9 金崇君. 手征介质构成的面心立方光子晶体光子带结构计算. *物理学报*, 1997, **46**(12): 2325 ~ 2329
Jin C J. *Acta Physica Sinica*, 1997, **46**(12): 2325 ~ 2329
- 10 秦柏. 微波光子晶体的实验研究. *光学学报*, 1999, **19**(2): 239 ~ 243
Qin B. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2): 239 ~ 244
- 11 Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans Antennas Propagation*, 1966, **17**(5): 302 ~ 307
- 12 朱志宏,叶卫民. 用时域有限差分方法研究二维光子晶体传输特性. *光学学报*, 2003, **23**(5): 511 ~ 515
Zhu Z H, Ye W M. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 511 ~ 515
- 13 Mur G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time domain electromagnetic field equations. *IEEE Trans Electromagnetic Compatibility*, 1981, **23**(4): 377 ~ 382

Analysis of Photonic Crystal Filter

Zhu Zhihong, Ye Weimin, Ji Jiarong, Yuan Xiaodong, Zeng Chun, Zhang Wanyun

Research Center of Photon and Phonon, National University of Defense Technology, Changsha 410073

Received date: 2003-06-16

Abstract Photonic crystal filters are formed by waveguides and cavities when line and dot defects are introduced into photonic crystals. Finite-difference time-domain (FDTD) method has been used to analyze these filters. Results indicate that the waves with certain frequencies in the waveguide can be downloaded into the cavity when resonance coupling occur and different frequencies are downloaded to cavities with different structures.

Keywords Photonic crystals; Finite-Difference Time-domain(FDTD) method; Waveguide; Cavity; Filter



Zhu Zhihong was born in 1978, in Hubei Province. He received his M. S. degree from National University of Defence Technology in 2002. Now he is a candidate for Ph. D. degree in National University of Defence Technology. His major research field is photonic crystal.