

一种紧凑的、可调的、基于缺陷共振的光开关*

吴芳芳 沈义峰[†] 王永春 韩奎 周杰 张园 陈琼

(中国矿业大学理学院物理系, 徐州 221116)

(2009年11月24日收到; 2010年5月17日收到修改稿)

采用平面波展开法(PWM)和时域有限差分(FDTD)法,研究光在含点缺陷的光子晶体波导中的传输特性. 计算结果表明,通过引入两共振腔(点缺陷),处于共振频率附近的光波将被完全反射回光子晶体波导. 由于共振频率随点缺陷的折射率的变化而改变,这种现象可用来设计可调光开关.

关键词: 光子晶体波导, 缺陷共振, 光开关, 透射率

PACS: 78.20.Ci, 42.25.Bs, 42.70.Qs, 42.79.Sz

1. 引言

光子晶体的概念是1987年分别由John^[1]和Yablonovich^[2]等人独立地提出来的,迄今该领域已经取得了迅猛的发展. 光子晶体最基本的特性是具有光子禁带,落在禁带中的光是被禁止传播的^[3]. 另一个主要特性是光子局域,当光子晶体中引入某种缺陷,和缺陷态频率符合的光子态将被限制在缺陷位置,一旦其偏离缺陷处,场振幅就会迅速衰减. 当在光子晶体波导结构中引入点缺陷后,由于点缺陷对原有的空间对称性产生微扰,形成一个微腔,并且微腔有其固有的共振模式,在一定条件下,光子晶体波导和微腔会发生耦合,波导中处在微腔共振频率附近的光波会被耦合到腔里面,从而影响光波在光子晶体波导中的传输特性^[4-8].

光子禁带的宽度和位置主要由电介质的折射率和光子晶体的晶格参数决定,可以通过外部环境的激励,例如施加电场、磁场或者改变温度来改变折射率和晶格结构等参数^[9],使得光子晶体的禁带可调,从而实现对光子禁带的控制,那必然将产生一系列的新效应和新现象,使基于光子晶体的光调制器(如光开关^[10,11]、光偏振片、可调滤波器等^[12,13])成为可能. 本文介绍了一种结构紧凑的引入点缺陷的光子晶体波导,对点缺陷处的缺陷模式

进行了计算,发现该点缺陷在禁带中引入了两种共振模式. 通过数值模拟实验得到,该结构可阻断一定频率范围的入射光通过波导,且随着点缺陷处折射率的改变,阻断频率沿一个方向线性变化,该结构可方便地用来实现光开关和可调滤波器.

2. 理论模型

本文研究的结构如图1所示,采用二维正方格子的光子晶体,折射率为 $n=3$ 的圆柱($9a \times 9a$)阵列处于空气中. 光子晶体的介质柱在 $x-z$ 平面内周期排列,圆柱的轴垂直于 $x-z$ 平面,晶格常数为 a ,介质柱半径为 $0.2a$,将其中沿 z 轴方向的一排柱子去掉,就构成了线缺陷波导.

采用标准的平面波展开法(PWM)来计算理想的二维正方格子光子晶体的能带结构^[14]. 从图2中可以看到对于TM模式(电场方向平行于柱子的轴向)光子晶体有着比较宽的禁带范围,对应归一化频率范围 $0.3229-0.4229(a/\lambda)$. 所以采用该频率范围内的高斯光束入射时,光将被限制在波导方向传播. 在 $Z=-5, X=0$ 处采用宽度为 $1a$ 的高斯场光源入射(入射方向如图1所示),探测器(如图1所示)中心位置放在 $Z=5, X=0$,探测器沿 x 方向排列,宽度为 $8a$,用FDTD法进行数值实验模拟,对禁带范围内不同频率光的透射率进行扫描探测,得到了图3所示的光子晶体波导的透射特性曲线,可以

* 中国矿业大学校基金(批准号: 0K061065)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: shen_syf@163.com

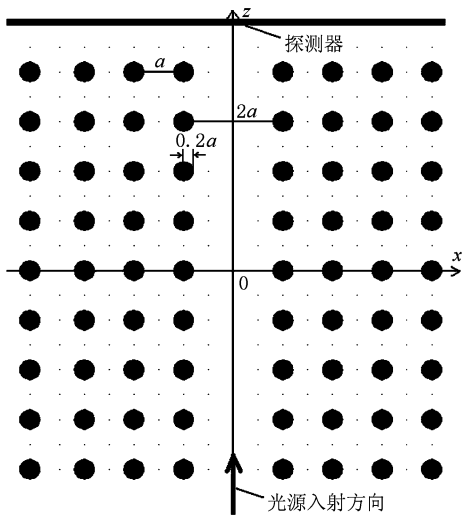


图1 光子晶体波导示意图

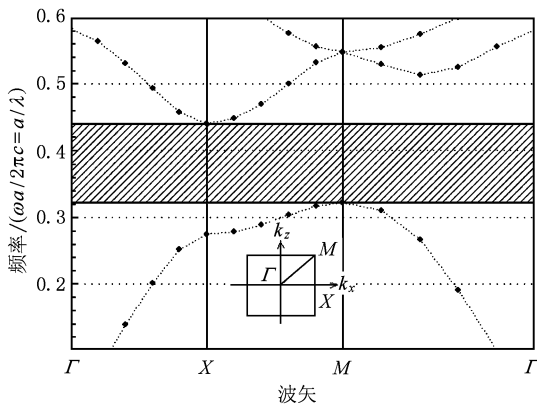


图2 光子晶体的 TM 模能带结构(插图为第一布里渊区)

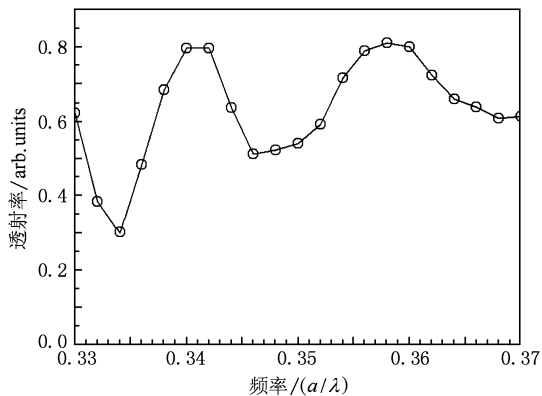


图3 光子晶体波导透射率曲线

看到对禁带范围内的光,所有的光都可以通过,该波导的透射率比较高.

3. 计算结果与模拟

现在我们在该光子晶体波导附近引入两个点缺陷,对称分布在波导的两侧. FDTD 模拟发现对于满足一定条件的点缺陷可以使得某些频率的光不能通过光子晶体波导,而只能局域在波导和点缺陷内或被反射回来. 如图4所示,图中修改后的柱子半径为 $0.4a$,折射率保持不变,仍为 $n=3$,高斯场光源和探测器的位置及宽度不变. 用 FDTD 法进行数值实验模拟,对不同频率光的能量透射率进行扫描探测,我们得到了如图5所示的光子晶体波导透射率曲线. 与未引入点缺陷的透射谱比较发现,在 $0.33-0.336(a/\lambda)$ 的频率范围透射率降到 10% 以内,而尤其值得注意的是,原来在 $0.34(a/\lambda)$ 频率附近的透射峰消失了,透射率几乎降低为零,也就是说由于缺陷的存在该频率被完全阻断,至少减少了 86% 的能量的透射. 这一现象可以运用于光开关器件,实现对光信号传输过程“开”和“关”的控制操作.

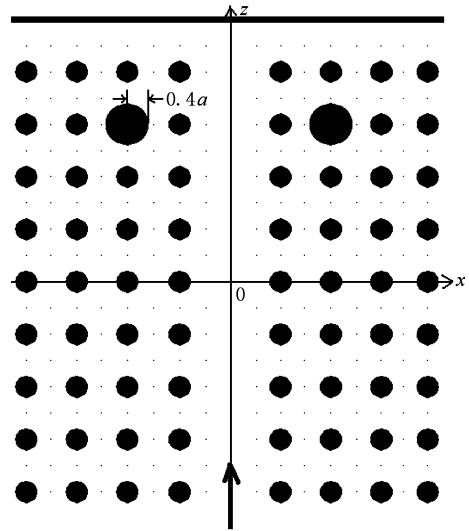


图4 引入点缺陷后的光子晶体波导

图6显示了频率为 $0.34(a/\lambda)$ 高斯场源 TM 波由下方入射时的稳态光场分布图. 从图中可以看到存在于波导中的光场绝大部分被耦合进了点缺陷中和被反射回来. 下面我们来分析产生这一现象得原因.

实验选用图7(a)右下角所示的超晶胞 ($6a \times 6a$), 用 PWM 进行能带计算, 由包含缺陷模式的能带图我们可以看到, 在原来的禁带中由于点缺陷的

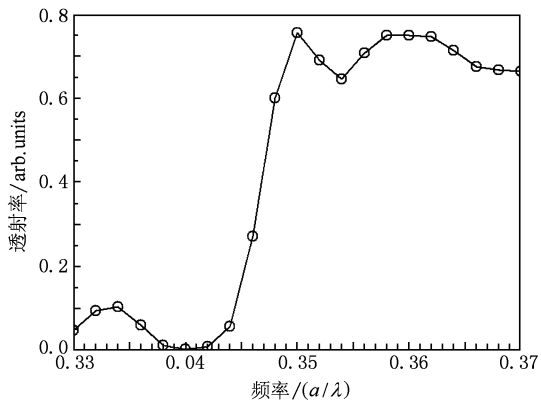


图5 对应图4的光子晶体透射率曲线

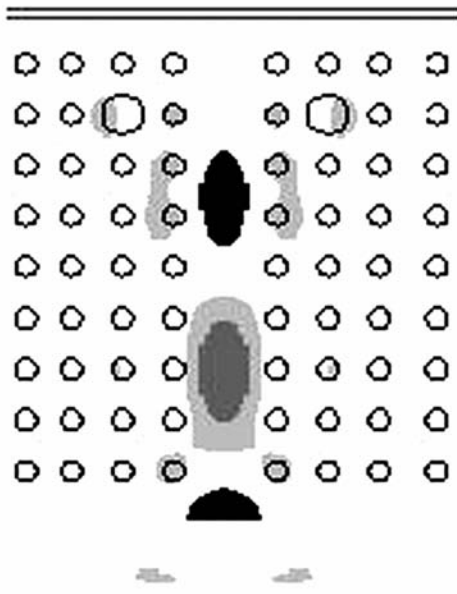


图6 FDTD数值模拟 E_y 场稳态分布图

引入,在频率 $0.3337-0.3348(a/\lambda)$ 中间出现了两种模式,处在这些模式的光是可以进入光子晶体点

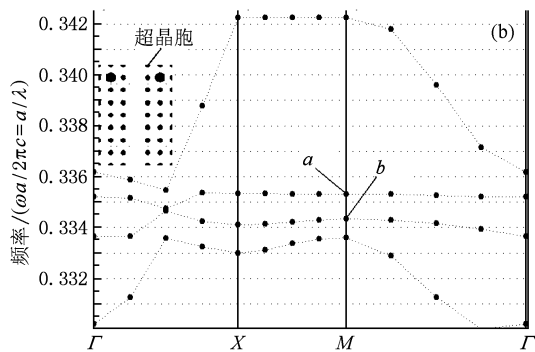
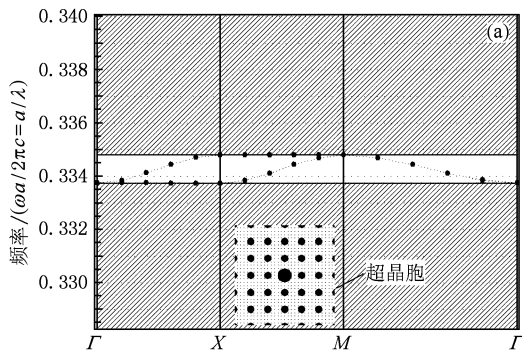


图7 (a)点缺陷的能带图;(b)点缺陷与波导结合后的能带图

缺陷内的.这两个模式在 M 点附近是简并的.此处禁带中出现的模式已形成具有一定频率宽度的能带,称为共振频带,表明该缺陷的 Q 因子较低.而通常所研究的一般都是引入高 Q 因子的点缺陷,从而实现单色的滤波或上传下载 (add-drop)^[15,16].图7(b)为包含波导和点缺陷的能带图,超晶胞 ($6a \times 8a$) 选取如图7(b)中插图,为包含点缺陷和波导的结构.从图中看到,由于波导的微扰作用,原来对应的两简并模式已经相互排斥,并形成小的方向带隙 $0.334-0.335(a/\lambda)$,光无法沿该方向传播.而 $\Gamma M, \Gamma X$ 方向模式的传输速度不为零,表明光场能量可沿侧向传输,最终被散射.

图8为图7(b)中的 a, b 两点的模式在晶体柱子中的电场分布图(其中 a, b 两点分别为点缺陷对应的共振频率带中两种模式的点).可以看出场集中于两点缺陷处,同时可以看到, a 模式是偶模式(场关于 z 轴对称),而 b 模式是奇模式(场关于 z 轴反对称).这表明:由于两点缺陷完全相同且位置关于波导是对称的,本身可存在两个简并模式;在相干和波导的微扰作用下,从这两个模式在频率上分离,形成了对称和反对称的两非简并模式.在两边柱子中,两个点缺陷处场的能量最大,原因就是点缺陷形成的微腔和线缺陷波导中的光波发生了共振,能量被耦合到微腔中了,使得该频率范围的光不能通过波导.与前面能带分析的结果相符.我们实际用 FDTD 法模拟出的完全不能通过波导的光的频率范围在共振频带附近为 $0.336-0.342(a/\lambda)$.

由于实际应用中,可以通过施加电场、磁场或者改变温度来使折射率细微改变,如果点缺陷的折射率细微的改变可以引起共振频带的偏移的话,那么该结构就可以实现可调滤波,在实际会有许多重要应用.

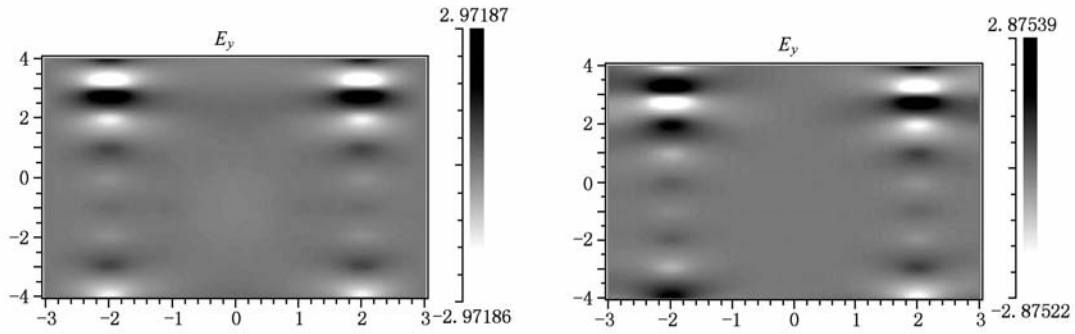


图8 两种模式场在晶体柱子中的电场分布图

下面我们模拟了通过改变点缺陷柱子的折射率来调节波导和点缺陷的共振频率,而缺陷处柱子半径不变仍为 $0.4a$. 由上面的通过用 PWM 扫描含单个点缺陷的能带图找共振频率带的方法,可以很方便快捷地找到不同折射率的点缺陷所对应的不同的阻断频率. 设 δn 为折射率的改变, δn 为 $-0.4, -0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2$, 得到了如图 9 的共振频率与点缺陷折射率变化量的关系图. 由于 δn 为 0.2 时, 共振频率带已经降低到了正方结构光子晶体禁带的下边沿, 所以图中没有显示. 从图中可以看出缺陷模位置是随缺陷折射率成线性变化的, 这样可以非常方便地通过改变缺陷处柱子的折射率来选择光子晶体波导的输出频率范围. 图 10(a) 为用 FDTD 法进行数值模拟的含有不同折射率的点缺陷的光子晶体波导的透射谱曲线, 图中可以看到: 折射率改变, 透射低谷是随之移动的; 图 10(b) 显示的是实际不能透过波导的光的频率与点缺陷处折射率变化量的关系图, 从图中可以看到, 阻断频率

可以低到正方结构光子晶体禁带的下边沿. 随着 δn 的减小, 阻断频率带是上移的, 所以只要选择合适的 δn , 就可以阻断处于正方格子禁带中的绝大部分频率的光. 该缺陷光子晶体波导能够实现比较宽的带阻开关. 这样就达到了通过折射率控制可调来实现光开关的目的.

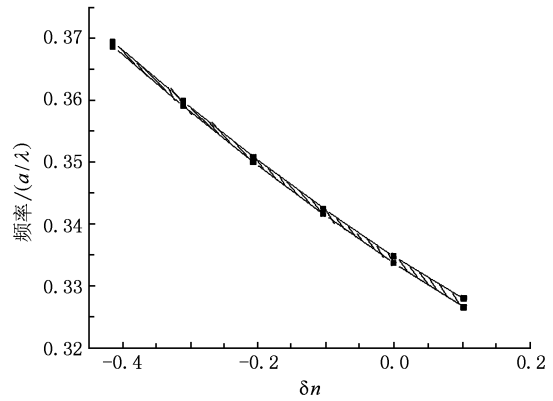


图9 共振频率与点缺陷处折射率变化量的关系图

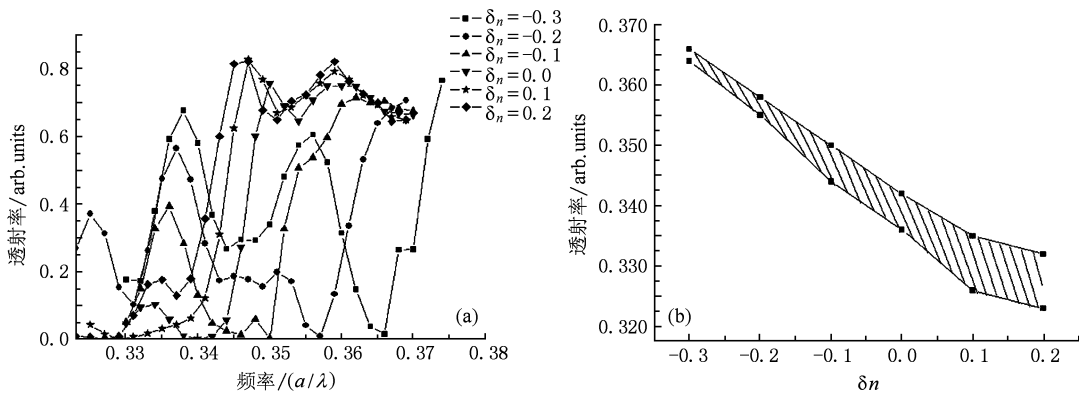


图10 (a) 不同折射率的点缺陷对应的透射率曲线; (b) 实际模拟共振频率与折射率变化量的关系图

4. 结 论

本文采用的晶体结构非常的简单、紧凑,通过理论分析和数值模拟结果可以看出,该含点缺陷的光子晶体波导,可调范围广,可以阻断很宽频率

范围的光,而当非阻断频率光信号入射时则能通过. 其工作机理并不是源于带隙机理,而是基于缺陷的共振耦合. 在理论上,二维光子晶体耦合腔结构可以非常方便地实现光学开关和可调宽带滤波器. 该设计思路可能会在实际器件设计中起指导作用.

- [1] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [2] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [3] Kurizki G, Haus J W 1994 *Modern Opt.* **412** 171
- [4] Feng Z F, Wang Y Q, Xu X S, Jiang S L, Hao W, Cheng B Y, Zhang D Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 62 (in Chinese) [冯志芳、王义全、许兴胜、江少林、郝伟、程丙英、张道中 2004 物理学报 **53** 62]
- [5] Lu H, Tian H P, Li C H, Ji Y F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2049 (in Chinese) [鲁辉、田慧平、李长红、纪越峰 2009 物理学报 **58** 2049]
- [6] Belotti M, Juan F G, Angelis S D, Galli M, Maksymov I, Andreani L C 2008 *Opt. Express* **16** 11624
- [7] Chen C C, Pertsch T, Iliev R, Lederer F, Tunnermann A 2006 *Opt. Express* **14** 2423
- [8] Zhu G X, Yu T B, Chen S W, Shi Z, Hu S J, Lai Z Q, Liao Q H, Huang Y Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1014 (in Chinese) [朱桂新、于天宝、陈淑文、石哲、胡淑娟、赖珍荃、廖清华、黄永箴 2009 物理学报 **58** 1014]
- [9] Figotin A, Godin Y A 1998 *Phys. Rev. B* **57** 2841
- [10] Sharkawy A, Shi S Y, Prather D W 2002 *Opt. Express* **10** 1048
- [11] Yin J L, Huang X G, Liu S H, Hu S J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5268 (in Chinese) [殷建玲、黄旭光、刘颂豪、胡社军 2006 物理学报 **55** 5268]
- [12] Ren H L, Jiang C, Hu W S, Gao M Y, Wang J Y 2006 *Opt. Express* **14** 2446
- [13] Zhang W F, Liu J H, Zhao W 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 739
- [14] Guo S P, Albin S 2003 *Opt. Express* **11** 167
- [15] Lu H S, Chiang Y J, Wang L 2007 *Jpn. J. Appl. Phys.* **46** 6898
- [16] Djavid M, Abrishamian M S 2007 *Opt. Quant. Electron.* **39** 1183

A compact and tunable photonic crystal switch based on defect resonance*

Wu Fang-Fang Shen Yi-Feng[†] Wang Yong-Chun Han Kui Zhou Jie Zhang Yuan Chen Qiong

(Department of Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

(Received 24 November 2009; revised manuscript received 17 May 2010)

Abstract

The transmission characteristics of a 2D photonic crystal waveguide with point defects were investigated by the plane wave expansion method (PWM) and finite difference time domain (FDTD) method. It was found that by introducing two resonant cavities (point defects) in the photonic crystal waveguide, light waves near the resonance frequencies can be totally reflected back to the waveguide. Since the resonance frequencies change with the variation of the refractive index of point defects, this phenomenon may be used to design a tunable optical switch.

Keywords: photonic crystal waveguide, defect resonance, photonic switch, transmission characteristic

PACS: 78.20.Ci, 42.25.Bs, 42.70.Qs, 42.79.Sz

* Project supported by the Foundation of China University of Mining and Technology (Grant No. 0K061065).

[†] Corresponding author. E-mail: shen_syf@163.com