

文章编号: 0253-2239(2010)07-2108-08

# 波导基本结构对光子晶体耦合腔光波导慢光特性的影响

李长红<sup>1</sup> 田慧平<sup>2</sup> 鲁 辉<sup>2</sup> 纪越峰<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 青岛大学自动化工程学院, 山东, 青岛 266071  
<sup>2</sup> 北京邮电大学光子信息与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要** 研究了二维光子晶体耦合腔波导的结构对慢光特性的影响,发现微腔间的距离  $n$ 、填充因子  $r/a$  和缺陷柱的尺寸  $r_d$  是影响光子晶体禁带中慢光导模传输特性的重要参数。随着缺陷微腔间距离的增加,导模群速度  $v_g$  急剧减小;当填充因子和缺陷柱尺寸增加时,导模向低频方向移动,同时,导模群速度降低;填充因子和缺陷柱尺寸降到一定数值后, $v_g$  达到最小值,此后,当  $r$  和  $r_d$  分别超出其特定值继续增大,导模群速度反而增大。取微腔之间介质柱个数为 6,普通介质柱尺寸为  $r=0.22a$ ,  $a$  为光子晶体晶格常数,缺陷柱尺寸为  $r_d=0.12a$ ,得到导模群速度最大值  $v_{g\max}<1.93\times 10^{-3}c$ ,带边处  $v_g<10^{-4}c$  ( $c$  为光速)。这一结果显示,通过基本结构设计可以实现对光子晶体耦合腔光波导中慢光的有效控制,这将为基于光子晶体功能器件的设计和应用提供有效的支持。

**关键词** 光子晶体;耦合腔波导;慢光;超胞;导模

**中图分类号** O734 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103007.2108

## Effect of Waveguide Basic Structure on Slow Light in Photonic Crystal Coupled Resonator Optical Waveguide

Li Changhong<sup>1</sup> Tian Huiping<sup>2</sup> Lu Hui<sup>2</sup> Ji Yuefeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Automation Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Information of Photonics and Optical Communication, Ministry of Education, School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract** Structure parameters of the slow light in the photonic crystal coupled resonator optical waveguide have been investigated. It is found that cavity distance  $n$ , filling factor  $r/a$  and size of the defect rod  $r_d$  are the most significant factors affecting the transmission properties of the slow light guided mode in the photonic band gap. With the increase of cavity distance, the group velocity  $v_g$  of guided mode decreases rapidly. When filling factor and defect rod size increase, the guided mode shifts towards a lower frequency with  $v_g$  decreasing simultaneously. When the filling factor and defect rod size increase to a respective certain value,  $v_g$  reaches a bottom value. And as  $r$  and  $r_d$  exceeds the above certain value, group velocity of the guided mode will increase. By choosing appropriate structure parameters of  $n=6$ ,  $r=0.22a$ ,  $r_d=0.12a$ , it is obtained that the maximum value of guided mode  $v_{g\max}=1.93\times 10^{-3}c$  and  $v_g<10^{-4}c$  at the band edge in the photonic crystal coupled resonator optical waveguide. These results indicate that effective control over the slow light in the photonic crystal coupled resonator optical waveguide could be realized through basic structure design, which may offers significant support for design and application of functional devices based on photonic crystals.

**Key words** photonic crystal; coupled resonator optical waveguide; slow light; supercell; guided mode

收稿日期: 2009-09-03; 收到修改稿日期: 2009-11-12

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z247, 2009AA01Z214)、国家 973 计划(2007CB310705)、国家自然科学基金(60707001, 60711140087)、新世纪人才支持项目(NCET-07-0110)、教育部“长江学者和创新团队发展计划”(IRT0609)和科技部国际合作计划(2006DFA11040)资助课题。

作者简介: 李长红(1973—),女,博士,讲师,主要从事宽带通信网、光纤通信与光子晶体及慢光等方面的研究。

E-mail: jiluch@126.com

# 1 引言

近年来,具有低群速度的慢光研究倍受关注。这是由于慢光在光延迟<sup>[1]</sup>、全光缓存<sup>[2]</sup>、光存储<sup>[3]</sup>和加强光与材料的相互作用<sup>[4]</sup>等方面具有极大的应用潜力,这些都是未来全光网络和全光信息处理的关键部件。目前,光纤通信系统中的光缓存器件一般是通过无源的光纤延时线或有源的光纤环路来模拟光缓存功能<sup>[5~7]</sup>,但是这样得到的光缓存器体积较大,同时也妨碍了缓存容量的扩展。为了实现真正的光缓存,已经提出多种实现慢光的机制,如电磁诱导透明(EIT)<sup>[8]</sup>,联合布居振荡(CPO)<sup>[9]</sup>,半导体放大器(SOA)<sup>[10]</sup>,光纤中的非线性增益<sup>[11,12]</sup>,光子晶体(PC)中的慢光<sup>[13]</sup>等。特别是光子晶体中的慢光,由于其紧凑的微小结构,新颖的控光特性以及室温运行等特性,具有深远的理论研究价值和极大的应用潜力。本文主要研究光子晶体耦合腔光波导(PC-CROW)中的慢光传输。

与光子晶体线缺陷波导(PCW)相比,PC-CROW具有非常平坦的导模<sup>[14~16]</sup>,能够支持更低的导模群速度。最近,一些研究机构对于二维PC微腔和PC-CROW进行了理论和实验研究<sup>[17,18]</sup>,主要集中于光子俘获和单腔对光脉冲的延迟以及PC-CROW中慢模耦合与色散特性的讨论<sup>[19~22]</sup>。此前,研究小组对于特殊结构的PC-CROW慢光结构特性进行了初步研究<sup>[23,24]</sup>,其中文献<sup>[24]</sup>仅研究了微腔距离对于慢光传输的影响,而光子晶体的基本结构,如填充因子、微腔距离和缺陷腔的尺寸决定着慢模特性:慢模的群速度、带宽、色散特性和慢模所在光子禁带(PBG)的频率范围,慢光导模在PBG中的相对位置等。在实际应用中,这些基本的结构参数决定着器件的特性和性能。本文采用

简单的具有等距离微腔的PC-CROW结构,理论研究了微腔距离、填充因子和微腔尺寸对慢光传输特性的影响。

# 2 结构设计和计算方法

研究中所讨论的PC-CROW采用四方晶格结构的圆柱形介质柱构成的二维光子晶体,结构如图1(a)所示。晶格常数为 $a$ ,基本柱半径为 $r$ ,介质柱材料取介电常数 $\epsilon=8.9$ ,背景为空气。波导的引入是在PC的 $\Gamma-X$ 方向周期性移除或者缩小一个介质柱,形成一系列的微腔,由7个 $7\times 3$ 超胞构成,波导长度为 $L=21a$ 。一个 $7\times 3$ 超胞单元包含一个微腔,超胞在 $\Gamma-X$ 方向铺排扩展构成耦合腔光波导。图中虚线部分为一个超胞单元,其横向尺寸 $\Delta=(n+1)a$ , $n$ 为相邻微腔之间介质柱的数目,表示微腔距离,图中结构 $n=2$ 。在分析中取晶格常数 $a=630\text{ nm}$ ,光子晶体填充因子表示为 $r/a$ ,缺陷介质柱尺寸为 $r_d$ 。通过改变参数 $n$ , $r$ 和 $r_d$ 来调整PC-CROW的结构,计算其色散特性从而计算其慢光传输特性。光子晶体的理论分析方法主要有时域有限差分法和平面波展开法等<sup>[25~27]</sup>。PC-CROW的色散特性采用含有超胞的平面波展开法(PWE)<sup>[28~30]</sup>进行计算。从色散关系计算PC-CROW的导模群速度为<sup>[31]</sup>

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n_g}, \quad (1)$$

式中 $k$ 是沿波导 $\Gamma-X$ 方向的波矢量, $c$ 是真空中光速, $n_g$ 是群折射率。

结构参数取 $r=0.2a$ , $r_d=0$ , $n=2$ ,如图1(a)所示结构。采用PWE法计算,图1(b)即为计算得到的TM模的典型色散带图,是归一化频率 $(\omega a/2\pi c)$ 关于波导方向波矢 $k$ 的曲线。从图1(b)可见,

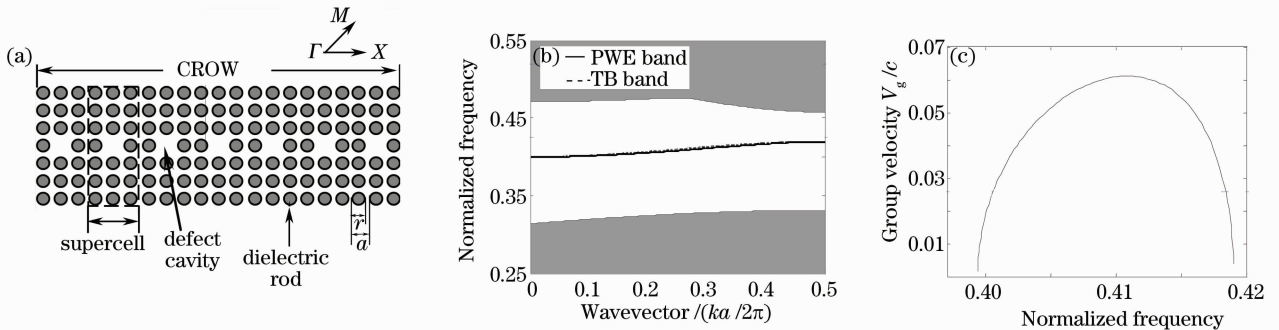


图1 (a) PC-CROW 结构示意图;(b) (a)中结构的典型 TM 模色散带图;(c)禁带导模的传输群速度

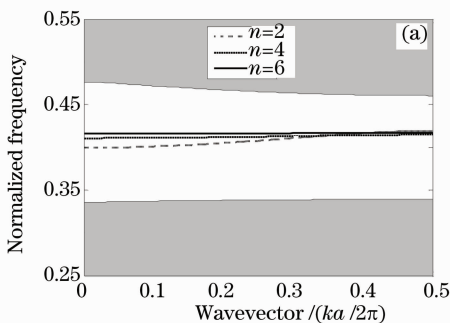
Fig. 1 (a) Schematic of a typical PC-CROW with square lattice; (b) band diagram of TM mode

in the proposed structure in (a); (c) group velocity of guided mode

PC-CROW 的光子禁带频率范围在  $0.3307 \sim 0.457$ , 禁带中有一带宽为  $0.01968$  的单一导模, 如图 1(b) 中 PBG 内实线, 虚线为紧束缚法 (TB) 计算得到的导模<sup>[14]</sup>, 其中心频率为  $0.4092$ , 对应波长:  $1539.59 \text{ nm}$ 。与文献[32]中 PCW 的导模相比, PC-CROW 导模更窄, 大约是其导模带宽的  $1/7$ , 说明 PC-CROW 支持的导模更加平坦, 具有更加缓慢的传输群速度。图 1(c) 描述了由 (1) 式计算的导模群速度  $v_g$ 。由图所示, 导模群速度  $v_g$  在中心频率  $0.4092$  附近取得最大值  $v_{g\max} = 0.061c$ , 带边附近群速度迅速下降, 小于  $0.005c$ 。分析中将详尽讨论如何通过结构改变调整 PC-CROW 的慢光传输特性: 传输频率、带宽和群速度等。

### 3 微腔间距对慢光传输的影响

调整相邻缺陷微腔之间介质柱数目  $n$ , 计算 PC-CROW 的色散带图和导模群速度。在所研究的 PC-CROW 结构中, 基本结构参数定义:  $a = 630 \text{ nm}$ ,  $r = 0.2a$ ,  $r_d = 0$  (移除一个介质柱)。图 2(a) 是 TM 模的色散带图,  $n$  的取值分别为  $2, 4$  和  $6$ 。对于不同的  $n$ , 光子禁带 (PBG) 变化微小, 而导模移动明显, 并且



迅速平坦化。随着微腔距离的增加, 导模的中心频率分别为  $0.4092, 0.41248$  和  $0.41613$ , 稍微移向高频方向。而相应的导模带宽从  $0.0196$  降低到  $0.0038$  和  $0.00104$ 。为了与 PCW 中的慢光导模相比较, 图 2(b) 画出了相同晶体结构下的 PCW 中的 TM 慢模色散带图, 导模带宽为  $0.14419$ 。显然, PC-CROW 的导模急剧平坦化。当  $n=2, 4$  和  $6$  时, 与 PCW 导模相比, PC-CROW 导模带宽分别下降到  $0.1359, 0.0264$  和  $0.0072$ 。图 3 给出了  $7 \times 3$  超胞  $n=2, 7 \times 5$  超胞  $n=4, 7 \times 7$  超胞  $n=6$ , 三个导模群速度关于归一化频率变化的曲线, 在这三种情况下, 各导模的最大群速度  $v_{g\max}$  分别为  $0.0602c, 0.0117c$  和  $0.0032c$ 。当微腔间的距离由  $n=2$  增大到  $n=4, 6$  时, 导模的最大群速度下降为  $n=2$  时最大群速度的  $0.194$  和  $0.053$  倍。随着微腔之间距离以二晶格长度增加, 波导中的导模群速度成五倍速率减小。当  $n=6$  时, 导模带边的群速度降到  $2 \times 10^{-4} c$  以下。而在相同结构 ( $a = 630 \text{ nm}, r = 0.2a, r_d = 0$ , 去掉一行介质柱) 的 PCW 中, 导模的最大群速度  $v_{g\max} = 0.2846c$ , 带边位置, 群速度小于  $0.025c$ 。由此可见, PC-CROW 中导模群速度较 PCW 中的群速度小两个数量级。

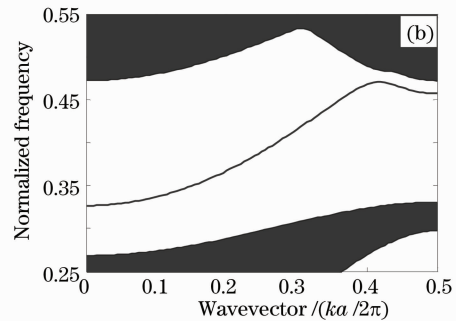


图 2 (a) 不同微腔距离下的 PC-CROW 中 TM 模色散带图; (b) 相同晶体结构的 PCW 中 TM 模色散带图

Fig. 2 (a) TM mode band diagram of PC-CROW with different distance of micro-cavities; (b) TM mode band diagram of PCW with same bulk structure of PC-CROW

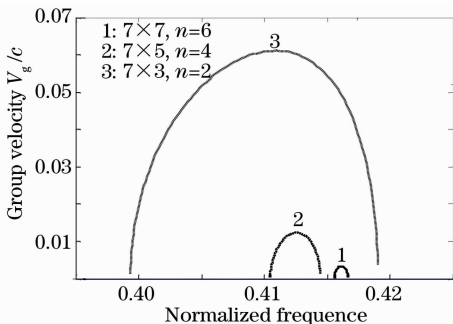


图 3 不同微腔距离的 PC-CROW 导模群速度

Fig. 3 Group velocity of guided mode with different distance of micro-cavities

导模群速度随着微腔距离的增加而迅速减小是由于微腔距离的增加导致腔模耦合减弱所致。PC-CROW 中的光传输是通过相邻微腔模式之间的弱耦合来实现的, 根据紧束缚法分析, 耦合腔光波导导模的群速度表示为<sup>[14]</sup>

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = -\Omega \Delta k \sin(k\Delta), \quad (2)$$

式中  $k$  为是耦合因子,  $\Omega$  是微腔响应模式频率, 从上式可以看到, 群速度  $v_g$  的大小与耦合因子  $k$  成正比关系, 当腔距离增加时, 腔模耦合减弱, 耦合因子减小, 群速度也就随之变小。

## 4 填充因子对 PC-CROW 中慢光性能的影响

填充因子由介质柱半径  $r$  与晶格常数  $a$  的比值 ( $r/a$ ) 来表示, PC-CROW 中的微腔由  $7 \times 7$  超胞移除中心位置的介质柱形成, 即腔间距离为  $n=6$ , 缺陷柱尺寸  $r_d=0$ , 取晶格常数  $a=630 \text{ nm}$ 。通过调整光子晶体基本介质柱的半径  $r$ , 改变 PC 的填充因子, 详细讨论了 PC-CROW 的禁带、禁带中的导模和导模群速度随着填充因子的变化关系。

分别取不同的介质柱半径, 计算 PC-CROW 的色散关系, 以此为基础分析填充因子对光传输的影响。图 4(a)~(d) 分别是  $r=0.12a, 0.16a, 0.20a$

和  $0.24a$  时, PC-CROW 的色散带图。图 4(a) 计算图线显示, 当  $r=0.12a$  时, 光子禁带出现在归一化频率 ( $\omega a/2\pi c$ ) 的  $0.4572 \sim 0.4940$  处, 对应禁带宽度  $0.0368$ 。单一导模出现在禁带中心附近的  $0.441 \sim 0.4769$  范围, 具有宽度  $0.0028$ ; 取  $r=0.16a$  时, PBG 沿频率下移到  $0.3888 \sim 0.4821$ , 宽度扩展到  $0.0933$ , 导模也向低频方向移动到  $0.438$  附近, 如图 4(b) 所示; 当  $r=0.20a$  和  $r=0.24a$  时, 色散曲线在图 4(c), 图 4(d) 里描述, PBG 和禁带导模继续下移, 且禁带宽度依次增大。随着介质柱半径的增大, 导模在 PBG 中的相对位置移向上边带, 即导模移动的速度小于 PBG 上边带移动速度。

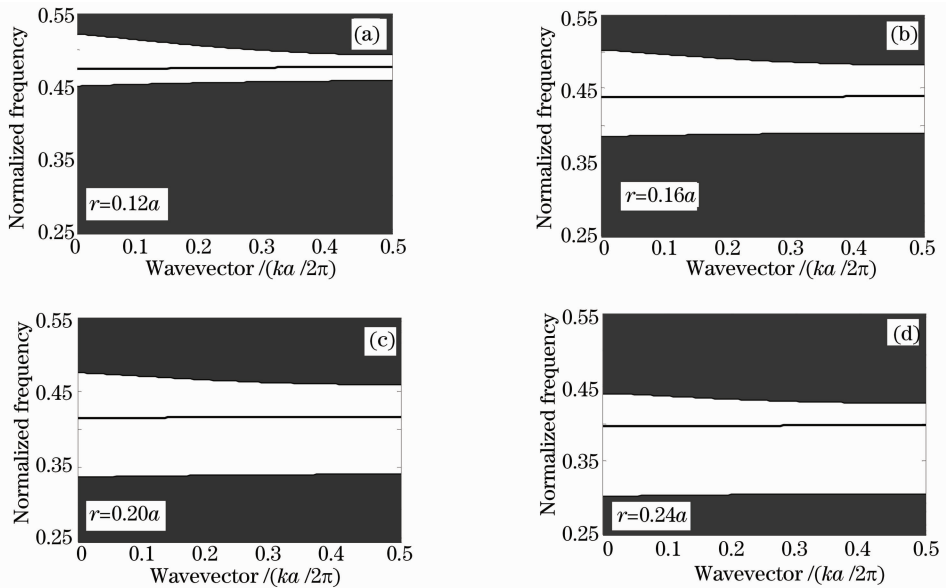


图 4  $n=6, r_d=0$  的 PC-CROW 中, 不同填充因子 ( $r/a$ ) 条件下的 TM 导模色散带图

Fig. 4 TM mode band diagram of PC-CROW with  $n=6, r_d=0$  under different fill factors of ( $a/r$ )

为了详细分析禁带宽度随填充因子的变化关系, 图 5(a) 描述了禁带宽度随填充因子的具体变化规律。其中  $\lambda=630 \text{ nm}$ ,  $n=6$ ,  $r_d=0$ , 禁带宽度由中心带隙比率 ( $\Delta\omega/\omega_0$ ) 表示。从图中可以看出随着填充因子的增加, 禁带持续展宽, 当填充因子增大到  $0.25$  时, 禁带宽度最宽, 为  $0.12176$ , 对应的波长是  $516.95 \text{ nm}$ , 相对宽度达到  $35\%$ , 此时, 导模出现在频率位置  $0.3928$ , 在禁带中心  $0.3916$  附近; 此后, 填充因子继续增加时, 禁带宽度变窄。

随着填充因子的增加, PBG 中的单一导模与禁带一起向低频方向移动, 而导模相对于禁带的位置向禁带的上边带移动, 即随着填充因子的增大, 导模向低频方向移动的速度更慢。图 5(b) 给出了与

图 5(a) 相同结构的 PC-CROW 随着填充因子的增加, 导模相对于 PBG 的运动趋势。导模的绝对频率位置随着填充因子的增大向低频方向移动; 而相对于 PBG, 导模移向禁带的上边带。当  $r < 0.15a$  时, 导模处于禁带中心附近; 当填充因子继续增加, 从  $r=0.17a$  增大到  $r=0.27a$ , 导模迅速移向 PBG 上边带,  $r$  超过  $0.27a$  后, 导模接近上边带, 且相对于带边的移动速度减缓, 当  $r=0.31a$  时, 导模隐入 PBG 上边带, 而不能在波导中有效传输。导模距离 PBG 带边越远, 在 PC-CROW 中光场被限制得越紧, 传输中能量损失越少, 也就越有利于光的传导, 波导设计时要尽可能地使禁带导模远离 PBG 带边。

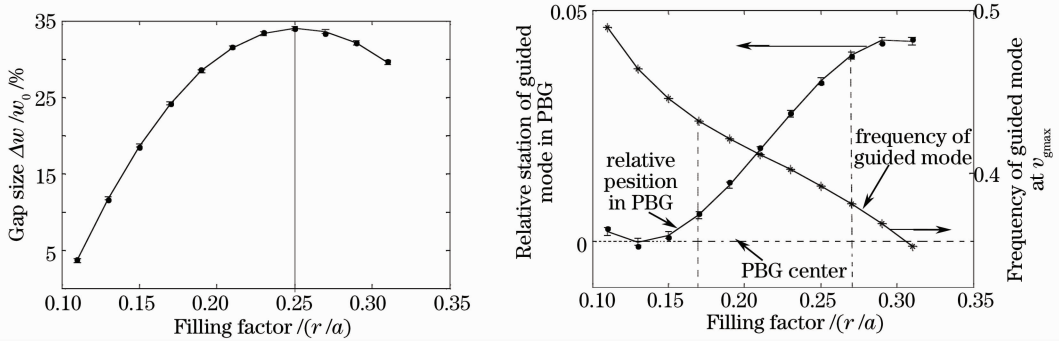


图 5 (a) PC-CROW 禁带宽度随着填充因子的变化规律; (b) 导模频率和导模在禁带中的相对位置随着填充因子  $r/a$  的变化规律

Fig. 5 (a) Gap size of PBG in PC-CROW versus filling factor; (b) relative position in PBG and frequency variation of the guided mode with the increase of filling factor

图 6(a) 给出了  $r = 0.12a, 0.16a, 0.20a$  和  $0.24a$  四种不同介质柱半径条件下导模群速度随着频率的变化曲线, 从图中可以看出, 填充因子 ( $r/a$ ) 从小增大时, 导模群速度随之减小; ( $r/a$ ) 增大到一定值, 群速度最小, 继续增大 ( $r/a$ ), 导模群速度反而增大。各导模群速度, 在带边位置都低于  $0.001c$ 。为了详细描述群速度关于填充因子的变化规律, 图 6(b) 给出了导模群速度最大值  $v_{gmax}$  及其对应的频率随填充因子的变化曲线。图中横坐标为填充因子

( $r/a$ ), 点标注曲线表示导模频率位置随填充因子的变化规律。导模的频率位置随填充因子的增加向低频方向移动。图 6(b) 中星线标注曲线描述速度最大值  $v_{gmax}$  随填充因子的变化规律。在图 6(b) 中 A 点,  $r = 0.22a$  时, 群速度达到最小值,  $v_{gmax} = 3.2 \times 10^{-3} c$ ,  $r$  超过  $0.22a$  后, 群速度反而随着填充因子的增大而增大。

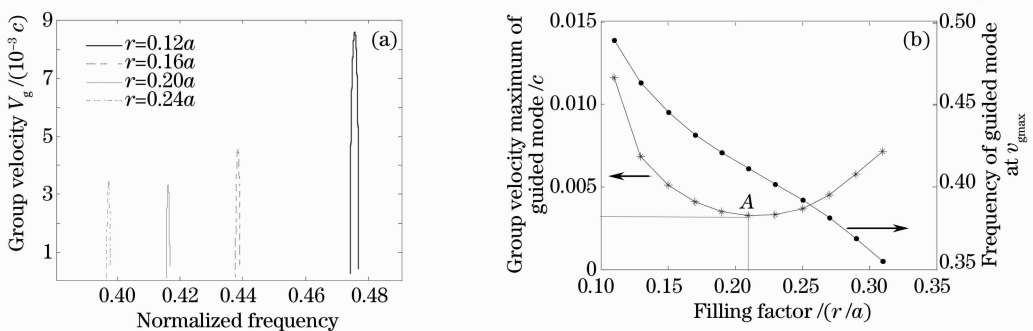


图 6 (a) 不同填充因子下各导模群速度; (b) 导模中心频率和最大群速度  $v_{gmax}$  随填充因子的变化规律

Fig. 6 (a) Guided mode group velocity versus frequency with  $r = 0.12a, 0.16a, 0.20a$  and  $0.24a$ ; (b) variation of  $v_{gmax}$  of guided mode versus filling factor

由此可见, 光子晶体的填充因子决定着 PC-CROW 的禁带与禁带导模的频率位置和带宽, 进而直接影响导模传输的群速度。当  $r = 0.22a$  时, 导模群速度最小,  $v_g < 3.2 \times 10^{-3} c$ ; 此时, PBG 相对宽度为 32.7% (接近于最大带宽 35%), 导模远离带边, 可以有效传输。

## 5 缺陷尺寸对 PC-CROW 慢光性能的影响

对于 PC-CROW, 固定微腔之间的距离  $n$  和 PC

填充因子 ( $r/a$ ), 调整构成缺陷微腔的缺陷介质柱尺寸  $r_d$ , 波导的导光性能也会受到很大影响。取  $a = 630 \text{ nm}, n = 6, r = 0.22a$ , 对  $7 \times 7$  超胞减小中心介质柱的尺寸  $r_d$  形成缺陷微腔。改变缺陷介质柱尺寸  $r_d$ , 来研究它对 PC-CROW 中慢光传输特性的影响。

图 7(a) 是缺陷柱尺寸分别取  $r_d = 0.04a, 0.08a, 0.12a$  和  $0.16a$  时的波导色散带图。计算发现, 缺陷柱的尺寸对 PC-CROW 的光子禁带的频率位置和宽度的影响很小, 在 4 种情况下 PBG 位置和带宽基本保持不变, 始终处于  $0.32019 \sim 0.44483$  的频率范围,

禁带中心频率为 0.3825, PBG 对应波长范围是 1416.27~1967.58 nm, 宽度为 551.31 nm. 缺陷柱半径分别取如上 4 个值时, 所支持导模的中心频率分别为 0.4001, 0.3809, 0.3543 和 0.3310. 随着缺陷尺寸的增加, 禁带中的导模向低频方向移动, 当缺陷柱尺寸增加到  $0.20a$  后, 导模隐入 PBG 的下边带以下.

图 7(b)详细描述了不同缺陷尺寸下, 导模在禁

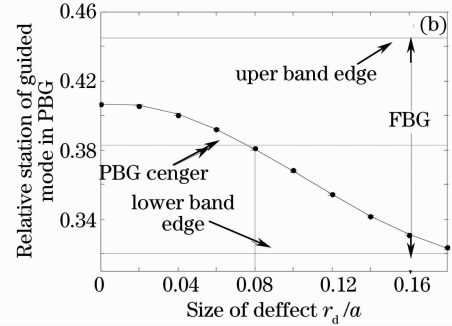
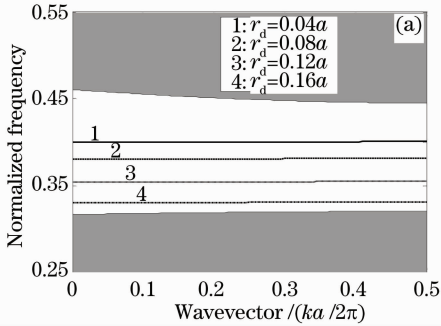


图 7 (a)不同缺陷尺寸  $r_d$  的 PC-CROW 色散带图; (b)导模在禁带中的相对位置随着缺陷尺寸的变化规律

Fig. 7 (a) Band diagram of PC-CROW at different  $r_d$ ; (b) relative position of guided mode in PBG versus size of defect rod

图 8(a)给出了缺陷柱半径分别取  $r_d = 0.04a, 0.08a, 0.12a$  和  $0.16a$  时, 各导模群速度随频率的变化关系. 缺陷尺寸从零开始增大, 导模群速度减小, 当  $r_d = 0.12a$  时, 导模群速度最小; 缺陷尺寸超过  $0.12a$  后, 群速度将随着缺陷尺寸增加而变大. 经过详细的分析和计算, 图 8(b)给出了导模群速度随缺陷尺寸  $r_d$  变化的曲线. 横坐标是缺陷尺寸  $r_d/a$ , 左侧纵坐标是导模群速度最大值, 黑点标注曲

线描述  $v_{gmax}$  随着缺陷尺寸  $r_d$  变化的规律; 右侧坐标是归一化频率, 十字标注曲线表示导模最大群速度  $v_{gmax}$  对应的频率随缺陷尺寸变化的规律. 从图中可以看出缺陷尺寸为  $r_d = 0.12a$  时, 群速度最小, 该导模群速度最大值是  $v_{gmax} = 1.93 \times 10^{-3} c$ , 带边处群速度小于  $10^{-4} c$ .

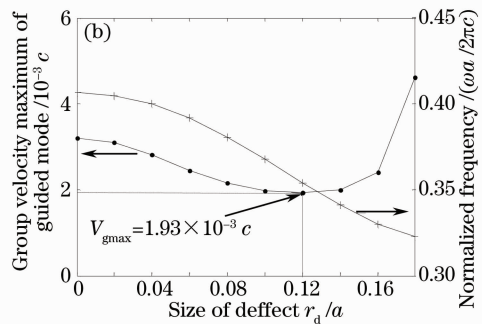
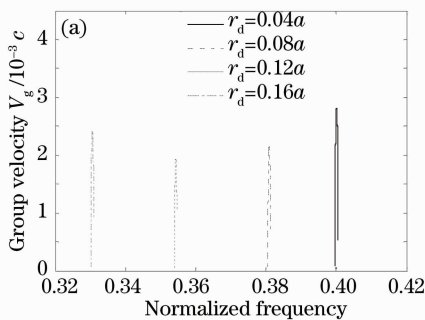


图 8 (a)不同缺陷尺寸  $r_d$  的 PC-CROW 导模群速度; (b)导模群速度最大值随着  $r_d$  的变化规律

Fig. 8 (a) Guided mode group velocity at different defect rod size  $r_d$ ; (b) The maximum of guided mode variation with size of defect rod  $r_d$

因此可见, 缺陷柱尺寸是除了微腔间距离和填充因子之外, 影响 PC-CROW 传输特性的第三个关键参数. 它的变化影响着禁带导模的频率位置和传输群速度. 当取参数  $n = 6, r = 0.22a$  时, PC-CROW 中的单一导模随着的缺陷柱半径  $r_d$  的增大, 向低频方向移动; 同时, 导模群速度减小, 当  $r_d$  增到一个特定值后,  $v_g$  随  $r_d$  增大反向增大. 在  $r_d =$

$0.12a$  时, 导模群速度最小, 其值为  $v_{gmax} = 1.93 \times 10^{-3} c$ , 这一传输速度比 PCW 慢光导模群速度小两个数量级, 比传统的普通  $SiO_2$  光波导中的光传输速度小三个数量级. 在导模带边附近, 群速度小于  $10^{-4} c$ , 可以在较短的器件尺寸上实现足够的慢光延迟和缓存.

## 6 结 论

研究了四方晶格排布介质柱构成二维光子晶体耦合腔光波导中慢光的传输特性。分析结果显示,微腔间的距离、填充因子和缺陷柱尺寸,三个结构参数直接影响波导中的慢光传输特性。1)随着微腔之间距离以二晶格长度增加,波导中的导模群速度最大值成五倍速率减小。2)随着 PC 填充因子的增加,波导禁带和禁带导模都向低频方向移动,同时 PBG 宽度增加,导模在禁带中的相对位置向禁带上边带移动,另外,当填充因子增大时,导模群速度先减小后增大,到 PC 结构中基本介质柱半径取  $r = 0.22a$  时,导模群速度最大值达到最小,为  $v_{\text{gmax}} = 3.2 \times 10^{-3} c$ ,此时,禁带相对宽度是 32.7%,导模在禁带中的位置远离 PBG 带边;3)缺陷尺寸的改变对 PC-CROW 的 PBG 基本没有影响,但随着缺陷尺寸  $r_d$  的增加,导模向低频方向移动,并且群速度逐渐减小,当  $r_d = 0.12a$  时导模群速度最小,缺陷尺寸继续增大,导模群速度将反而增大。当取微腔距离  $n = 6$ ,填充因子  $r/a = 0.22$ ,缺陷尺寸  $r_d = 0.12a$  时,导模群速度最大值达到  $v_{\text{gmax}} = 1.93 \times 10^{-3} c$ ,带边群速度小于  $10^{-4} c$ ,禁带相对宽度为 32.7%,接近于最大宽度 35%,导模远离 PBG 带边,可以有效传输。这个导模最大群速度比传统波导中的光传输速度降低了三个数量级。

三个参数相比,微腔间的距离对群速度的影响最明显,填充因子的作用次之,缺陷尺寸的影响最弱,实际应用中可以根据具体要求,合理调整三个结构参数制作符合要求的基于光子晶体的功能器件。

## 参 考 文 献

- 1 M. L. Povinelli, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos. Slow-light, band-edge waveguides for tunable time delays [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 7145~7159
- 2 R. S. Tucker, P. C. Ku, C. J. Chang-Hasnain. Slow-light optical buffers: capabilities and fundamental limitations [J]. *Lightwave Technol.*, 2005, **23**(12): 4046~4066
- 3 R. S. Tucker, P. C. Ku, C. J. Chang-Hasnain. Delay-bandwidth product and storage density in slow-light optical buffers [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(4): 61~62
- 4 M. Soljacic, S. G. Johnson, S. Fan *et al.*. Photonic-crystal slow-light enhancement of nonlinear phase sensitivity [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9): 2052~2059
- 5 R. Almeida, J. Pelegrini, H. Waldman. A generic-traffic optical buffer modeling for asynchronous optical switching networks [J]. *Commun. Lett.*, 2005, **9**(2): 175~177
- 6 A. Fayoumi, A. P. Jayasumana. A surjective-mapping based model for optical shared-buffer cross-connect [J]. *IEEE ACM Trans. Netw.*, 2007, **15**(1): 226~233
- 7 A. Kushawaha, S. K. Bose, Y. N. Singh. Analytical modeling for performance studies of an. FLBM-based all-optical packet

- switch [J]. *J. IEEE Comm. Lett.*, 2001, **5**(5): 227~229
- 8 L. V. Hau, S. E. Dutton, C. H. Behroozi. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomicgaps [J]. *Nature*, 1999, **397**: 594~598
- 9 P. C. Ku, F. Sedgwich, C. J. Chang-Hasnain *et al.*. Slow light in semiconductor quantum wells [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(19): 2291~2293
- 10 F. Öhman, K. Yvind, J. Mørk. Slow light in semiconductor waveguide for true-time delay applications in microwave photonics [J]. *IEEE Photo. Tech. Lett.*, 2007, **19**(15): 1145~1147
- 11 Y. Okawachi, M. S. Bigelow, J. E. Sharpig *et al.*. Tunable all-optical delays via brillouin slow light in an optical fiber [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(15): 153902
- 12 A. Schweinsberg, N. N. Lepeshkin, M. S. Bigelow *et al.*. Observation of superluminal and slow light propagation in erbium-doped optical fiber [J]. *Europhys. Lett.*, 2006, **73**(2): 218~224
- 13 Y. A. Vlasov, M. O. Boyle, H. F. Hamann *et al.*. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides [J]. *Nature*, 2005, **438**: 65~69
- 14 A. Yariv, Y. Xu, R. K. Lee *et al.*. Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(11): 711~713
- 15 E. Ozbay, M. Bayindir, I. Bulu *et al.*. Investigation of localized coupled-cavity modes in two-dimensional photonic bandgap structures [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(7): 837~843
- 16 K. Sakai, E. Miyai, S. Noda. Two-dimensional coupled wave theory for square-lattice photonic-crystal lasers with TM-polarization [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 3981~3990
- 17 T. Tanabe, M. Notomi, E. Kuramochi *et al.*. Trapping and delaying photons for one nanosecond in an ultrasmall high-Q photonic-crystal nanocavity [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(1): 49~52
- 18 T. Tanabe, M. Notomi, E. Kuramochi *et al.*. Large pulse delay and small group velocity achieved using ultrahigh-Q photonic crystal nanocavities [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(12): 7826~7838
- 19 H. Altuga, J. Vuckovic. Experimental demonstration of the slow group velocity of light in two-dimensional coupled photonic crystal microcavity arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(11): 111102
- 20 T. Yang, Y. Sugimoto, S. Lan *et al.*. Transmission properties of coupled cavity waveguides based on two-dimensional photonic crystals with a triangular lattice of air holes [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(9): 1922~1926
- 21 I. Neokosmidis, T. Kamalakis, T. Sphicopoulos. Optical delay lines based on soliton propagation in photonic crystal coupled resonator optical waveguides [J]. *IEEE. J. Quantum. Electron.*, 2007, **43**(7-8): 560~567
- 22 A. Martinez, A. Garcia, P. Sanchis *et al.*. Group velocity and dispersion model of coupled-cavity waveguides in photonic crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(1): 147~150
- 23 Lu Hui, Tian Huiping, Li Changhong *et al.*. Research on new type of slow light structure based on 2D photonic crystal coupled cavity waveguide [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 2049~2054
- 鲁 辉, 田慧平, 李长红 等. 基于二维光子晶体耦合腔波导的新型慢光结构研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 2049~2054
- 24 Li Changhong, Tian Huiping, Lu Hui *et al.*. Investigation on structure properties of slow light in photonic crystal coupled resonator optical waveguide [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3216~3219
- 李长红, 田慧平, 鲁 辉 等. 光子晶体耦合腔光波导慢光结构特性研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3216~3219

- 25 Quan Yujun, Han Peide, Lu Xiaodong *et al.*. A numerical method to calculate and analyze of defect modes in two-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1841~1846  
全宇军, 韩培德, 陆晓东等. 一种计算和分析二维光子晶体缺陷模式的方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12): 1841~1846
- 26 Lin Xubing, Chen Yujie, Li Baojun. Photonic crystal with absolute band gap in a two-dimensional quasi-honeycomb structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 127~130  
林旭彬, 陈钰杰, 李宝军. 类蜂窝状结构完全带隙二维光子晶体[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 127~130
- 27 Wu Junfeng, Chang Yuchun, Wang Haisong. Transmission characteristic of photonic crystal waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(8): 711~713  
宋俊峰, 常玉春, 王海嵩等. 光子晶体光波导传输特性研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(8): 711~713
- 28 S. P. Guo, S. Albin. Numerical techniques for excitation and analysis of defect modes in photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(9): 1080~1089
- 29 S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis [J]. *Opt. Express*, 2001, **8**(3): 173~189
- 30 J. Shim, E. K. Lee, Y. J. Lee *et al.*. Density-function calculations of defect formation energies using the supercell method; Brillouin-zone sampling [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **71**(24): 245204
- 31 She Shouxian. *Physical Principles of Waveguide Optics* [M]. Beijing: Northern Jiaotong University Press, 2002  
余守宪. *导波光学物理基础* [M]. 北京: 北方交大出版社, 2002
- 32 C. H. Li, H. P. Tian, C. Zheng *et al.*. Improved line defect structures for slow light transmission in photonic crystal waveguide [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **279**(1): 214~218