

基于二维光子晶体耦合腔波导 的新型慢光结构研究*

鲁 辉† 田慧平 李长红 纪越峰

(北京邮电大学电信工程学院光通信与光波技术教育部重点实验室 北京 100876)

(2008 年 7 月 10 日收到 2008 年 8 月 1 日收到修改稿)

对二维介质柱光子晶体耦合腔波导慢光结构进行了研究,发现随着缺陷腔之间晶格个数增多,群速度减小很快,选用 7×7 超胞单元时耦合腔波导结构的导模最大群速度 $v_{g\text{-max}}$ 只有光子晶体线缺陷波导的 $1/251$, 然后对 7×7 超胞单元的缺陷腔周围四个介质柱半径进行调整,发现新型结构导模的 $v_{g\text{-max}}$ 进一步减小,最小可达到 $5.89 \times 10^{-4} c$, 约为未调整之前的 $1/5$. 最后通过比较发现,当改变缺陷腔上下相邻两个介质柱半径时得到的结构具有更好的慢光特性.

关键词:光子晶体,耦合腔波导,慢光,导模

PACC: 7820P, 4282

1. 引 言

近年来,作为实现下一代光接入网的核心器件之一,全光缓存器件^[1-4]已经成为光通信领域研究的热点.目前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.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.

光子晶体^[5-8] (photonic crystal, PhC) 作为一种介质折射率周期性分布的材料,可以通过人为结构设计实现对其光子态密度和色散曲线的调制.例如,可以在二维光子晶体中移除一行介质柱,形成光子晶体线波导,禁带中产生的平坦导模就会产生较小的群速度,即慢光^[9-11]. 基于光子晶体慢光,可以设计实现光子晶体光缓存器,与基于光纤的光缓存器相比,具有体积小(尺寸达到光波长量级),群速度低,可控性高等优点,因此越来越受到人们的关注.一般来说,三维光子晶体具有更好的光子带隙特性,对于实现慢光来说具有更大的灵活性和调制性,但是其计算的复杂度太高,而制作问题对人们来说也是个

最大的困扰.二维光子晶体因其制作相对简单,又存在着众多的应用,所以利用二维光子晶体慢光来实现光缓存有着广阔的发展前景.

已有光子晶体慢光研究多是通过二维光子晶体线缺陷波导^[12,13] 或者耦合腔波导^[14-17] (coupled cavity waveguide, CCW) 来实现慢光.线缺陷波导中传输的光波群速度仍然较大,所以慢光效应较弱,而对于 CCW,通过调整其两腔之间的间隔大小或腔周围的介质柱结构,可以大幅减小传输光的群速度,从而实现很强的慢光.本文基于对普通 PhC CCW 慢光特性的分析,研究结构参数对其传输光群速度的影响,并对其结构进行调整,得到的新型 PhC CCW 结构可以实现最大群速度为 $5.89 \times 10^{-4} c$ 的慢光导模,具有更好的慢光特性.

2. 普通 PhC CCW 慢光特性分析

2.1. 普通 PhC CCW 结构定义

本文以二维光子晶体四方晶格介质柱结构为例

* 国家自然科学基金(批准号 60707001, 60711140087), 国家重点基础研究发展计划(973 项目)(批准号 2007CB310705), 国家高技术研究发展计划(863)(批准号 2007AA01Z247), 新世纪优秀人才支持计划(批准号 NCET-07-0110), 教育部“长江学者和创新团队发展计划”(批准号 JRT0609), 科技部国际合作计划(批准号 2006DFA11040)资助的课题.

† E-mail: yihui18@126.com, hptian@bupt.edu.cn

进行分析. PhC CCW 结构如图 1 所示. a 为晶格常数, 介质柱半径为 R , 介质柱介电常数选为 $\epsilon_a = 8.9$, 背景介质选为空气, 介电常数 $\epsilon_b = 1$. 图中虚线部分为超胞单元, 其在两个方向上的尺寸分别为 Ma 和 Na (M, N 取正整数, 与 a 之间为乘积关系).

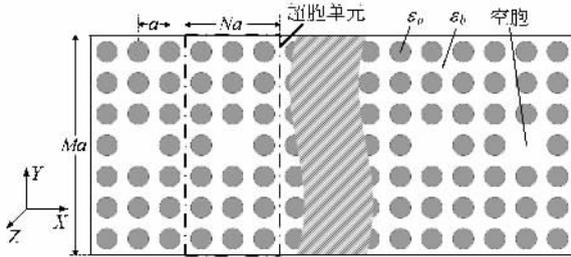


图 1 普通 PhC CCW 结构示意图(a 为晶格常数, Ma, Na 为超胞在两个方向上的尺寸, ϵ_a, ϵ_b 分别为介质柱和背景的介电常数, 虚线部分为超胞单元, 图中 $M=7, N=3$)

2.2. 普通 PhC CCW 的慢光特性分析

由于四方晶格介质柱结构二维光子晶体的 TM 模带隙比较明显, 因此我们通过平面波展开法 (PWE) 对其 TM 模的色散曲线进行分析. 假定介质柱半径 $R = 0.2a$, 光沿着 X 方向传播. 当 $M = 7, N = 1, 3, 5, 7$ 时, 可得到其导模色散曲线如图 2 所示. 图中可以看出, 四种情况下的带隙中均存在一个导

模, 这是由于缺陷腔之间的耦合作用而产生的波导效果. 对于图 2(a) $N = 1$ 的情况, 此时已经不再是 PhC CCW 结构, 而成为 PhC 线缺陷波导, 其导模与另外三种情况相比, 平坦性很差. 当 M 不变, 随着 N 的增大, 导模会变得越来越平坦, 根据群速度公式 $v_g = \frac{d\omega}{dk}$ 可知, 其群速度会越来越小. 对图 2 中 (b), (c), (d) 三种情况下的导模进行求导计算可得对应的群速度曲线如图 3 所示. 横轴分别选取波矢 k 和归一化频率两种情况. 可以看出, 随着 N 的增大, 缺陷腔之间距离增大, 腔模耦合大幅减弱, 导致光传输速度受到影响, 群速度 v_g 减小很快. 具体计算可知, $N = 3, 5, 7$ 时群速度最大值 $v_{g-\max}$ 分别为 $6.11 \times 10^{-2} c, 1.23 \times 10^{-2} c, 3.33 \times 10^{-3} c$ (c 为光在真空中的光速). 而对于 $N = 1$ 即线缺陷波导的情况, $v_{g-\max}$ 为 $0.58c$, 大约为 7×7 超胞单元 CCW 的 251 倍, 由此可见, PhC CCW 结构要比 PhC 线缺陷波导的慢光性能好很多. 另外从图中还可以看到, 随 N 增大, 导模的中心频率会向高频方向移动.

上述分别对 $7 \times 3, 7 \times 5, 7 \times 7$ 三种情况进行了仿真分析. 当我们继续增大 N 值, 研究 7×9 的情况时发现, 由于两个相邻耦合腔之间距离过大, 光耦合作用被过度减弱, 带边移动很大, 已经得不到稳定的慢光效应, 如图 3(c) 所示. 因此, 相比较而言, 7×7

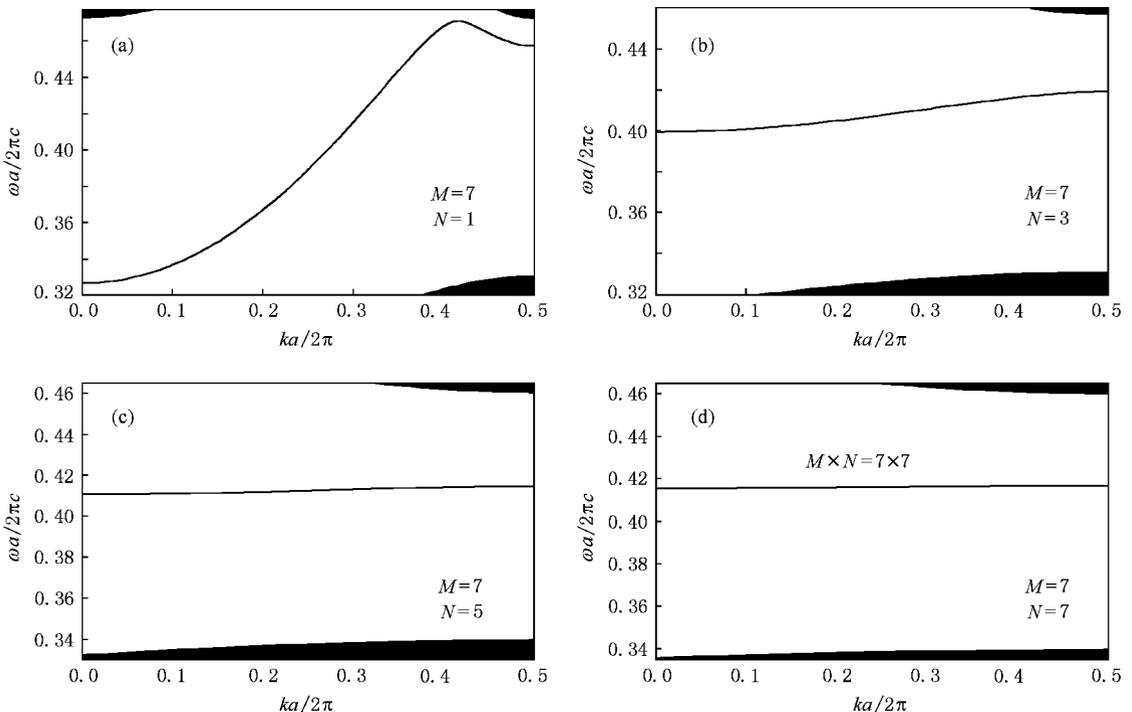


图 2 超胞选取为 $M \times N$ ($M=7, N=1, 3, 5, 7$) 时 PhC CCW 带隙导模 (TM 模) 色散曲线图 (横轴为波矢 k , 纵轴为归一化频率)

超胞结构是较理想的慢光超胞结构。

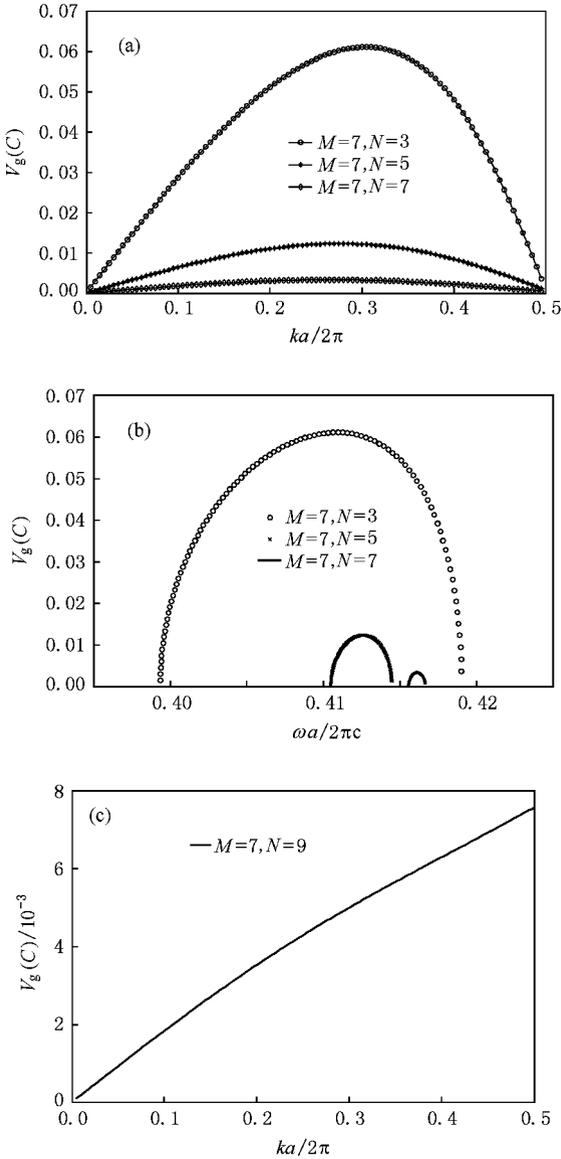


图3 超胞选取为 $M \times N$ ($M=7, N=3, 5, 7, 9$) 时 PhC CCW 导模群速度

3. 新型 PhC CCW 慢光特性分析

3.1. 新型 PhC CCW 结构定义

为了得到更小的群速度,我们下面将以 7×7 的超胞单元为研究对象,设计新型慢光结构,如图4所示.在普通 PhC CCW 基础上,对原缺陷腔附近的四个介质柱半径进行调整,左右两个介质柱 j ,对应半径 R_j ,上下两个介质柱 k ,对应半径 R_k .介质柱与背景的介电常数保持不变.另外,定义慢光因子 $S =$

$\frac{v_{g-\max}}{c}$, 则对于 7×7 超胞单元的 PhC CCW 结构 $S = 3.33 \times 10^{-3}$.

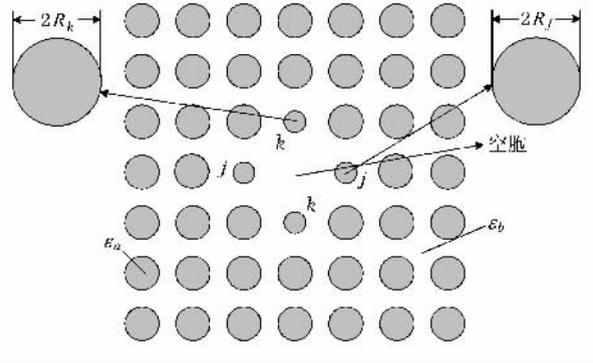


图4 新型 PhC CCW 的 7×7 超胞结构

3.2. 新型 PhC CCW 慢光特性分析

我们分别对 R_j 和 R_k 的大小进行调整,分下面四种情况来研究变化后结构的慢光特性.

3.2.1. $R_k = R = 0.2a, R_j$ 由小到大变化(情况 A)

当 R_j 由 0 开始变化,取值间隔为 $0.05R$ 时,此时超胞中的点缺陷实际为 3 个,带隙中应该存在一个以上的导模,例如当 $R_j = 0$ 时有三个导模,如图5所示.对每种情况下的多个导模取群速度最小的导模进行分析,可得到图6.

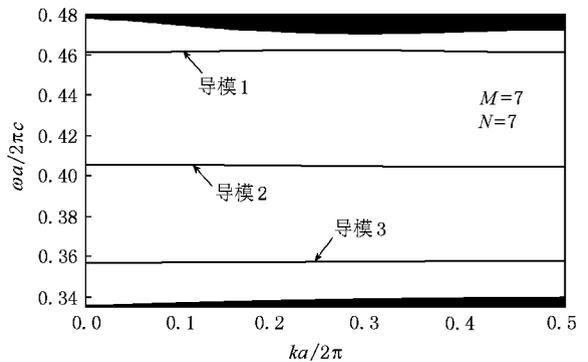


图5 $R_k = R = 0.2a, R_j = 0$ 时 PhC CCW 的色散曲线

图6可以看出,当 $R_k = R = 0.2a, R_j = 0, 0.05a, 0.25a$ 时群速度均小于 $R_j = 0.2a$ 的群速度, $R_j = 0$ 时最小, $S = 2.51 \times 10^{-3}$,小于 $R_j = 0.2a$ 时的 3.33×10^{-3} .当 $R_j = 0.5a$ 时最大, $S = 1.52 \times 10^{-2}$.另外还可以看出,当 $0 \leq R_j \leq 0.25a$ 时, $k = 0.5$ 带边处群速度很小,达到了 10^{-4} 量级.而对于 $R_j \geq 0.3a$ 时, $k = 0.5$ 带边处群速度较大,说明此时随着 j 柱

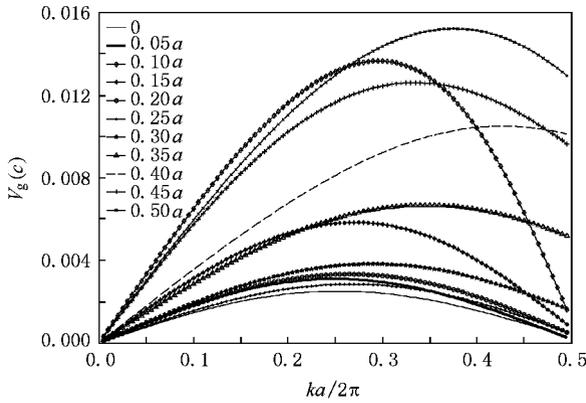


图 6 $R_k = R = 0.2a$, R_j 从 0 变到 $0.5a$ 时的群速度曲线

半径的增大,带边产生了向右的较大平移.

3.2.2. $R_j = R = 0.2a$, R_k 由小到大变化(情况 B)

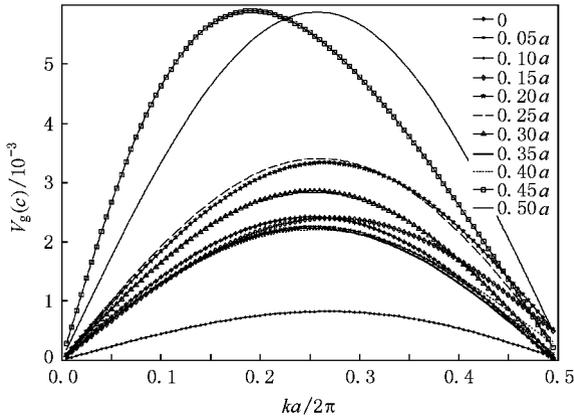


图 7 $R_j = R = 0.2a$, R_k 从 0 变到 $0.5a$ 时的群速度曲线

与情况 A 类似,当 R_k 由 0 开始变化,取值间隔为 $0.05R$ 时,群速度曲线如图 7 所示.图中可以看出,在 $0 \leq R_k \leq 0.40a$ 的范围内,导模的慢光特性较好.除了 $R_k = 0.25a$ 时群速度比 $R_k = 0.2a$ 时稍大,其余情况下群速度均更小.尤其当 $R_k = 0.1a$ 时, S 值达到 8.23×10^{-4} ,大约是 $R_k = 0.2a$ 时的 $1/4$.只有当 $R_k = 0.45a$ 、 $0.50a$ 两种情况下, S 较大,达到 5.9×10^{-3} .而且从群速曲线在带边 $k = 0.5$ 处的值可以看出,几乎没有带边移动.整体来看,情况 B 下的慢光性能要比情况 A 更好.

3.2.3. $R = 0.2a$, $R_j = 0$, R_k 由小到大变化(情况 C)

下面让 $R_j = 0$,看 R_k 由 0 变到 $0.5a$ 时的导模群速度情况.此时超胞中的点缺陷个数已经达到 5 个,导模的个数更多.我们同样取群速度最小的那个导模分析,得到图 8.图中可以看出,群速度最小的

情况发生在 $R_k = 0.05a$ 时, $S = 2.25 \times 10^{-3}$,另外, $R_k = 0.1a, 0.2a, 0.25a$ 时群速度很接近. $R_k = 0, 0.35a, 0.40a$ 时群速度较大,在 $R_k = 0$ 时 S 值达到了 1.196×10^{-2} .带边移动情况发生在 $R_k = 0.45a, 0.50a$ 时,图中可以看出相对情况 A 移动量较小.

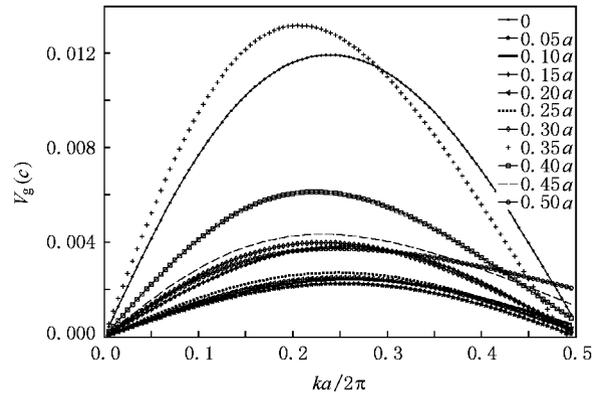


图 8 $R = 0.2a$, $R_j = 0$, R_k 由 0 变到 $0.5a$ 时的群速度曲线

3.2.4. $R = 0.2a$, $R_k = 0.1a$, R_j 由小到大变化(情况 D)

由于在 B 中得到 $R_k = 0.1a$ 时 S 最小的结论,下面让 $R = 0.2a$, $R_k = 0.1a$, R_j 由小到大变化,对导模群速度计算可得曲线图 9.图中可知,当 $R_j = 0.25a$ 时 S 最小,达到 $S = 6.16 \times 10^{-4}$,当 $R_j = 0.10a, 0.45a$ 时群速度较大, $R_j = 0.45a$ (群速度较大,图中未画出)时 $S = 1.1 \times 10^{-2}$.其余情况下慢速因子均较小,在 3.2×10^{-3} 以下. $R_j = 0.10a, 0.30a, 0.45a$ 三种情况下带边移动较大.

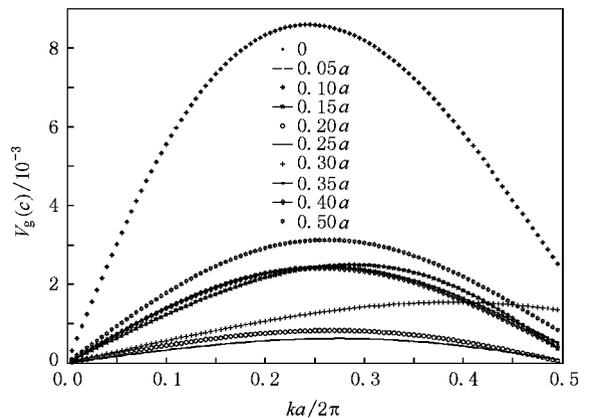


图 9 $R = 0.2a$, $R_k = 0.1a$, R_j 由小到大变化

综合四种情况的分析结果,将 S 随缺陷介质柱半径的变化情况汇总可得图 10.图中可以看出,当缺陷介质柱半径取值位于 $0.2a$ 及 $0.25a$ 附近时,得

到的 S 值较小. 其中在情况 D 下, 当 $R_j = 0.25a$ 时 S 值最小, 达到 6.16×10^{-4} , 即图中 M 点. 另外, A, C, D 三种情况下的 S 在某些点的值存在剧烈变化, 而情况 B 的值相对来说变化比较平缓. 对于情况 B, 当 $R_k = 0.1a$ 时, $S = 8.23 \times 10^{-4}$, 即图中点 N , S 值仅次于点 M . 综合带边情况可以看出, 情况 B 的结构具有更稳定的群速度特性, 因此具有更好的应用价值.

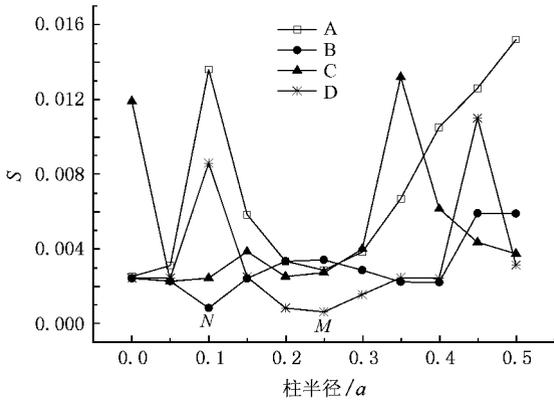


图 10 A, B, C, D 四种情况慢光因子 S 随缺陷介质柱半径变化曲线

3.3. 新型 PhC CCW 结构优化分析

下面我们分别针对 M, N 两点周围的取值情况进行更进一步的分析. 对于 M 点, 我们取其左右两边 $0.21a$ — $0.27a$ 的范围研究, 间隔为 $0.01a$, 可得其导模与群速度曲线如图 11 所示. 可以看出, 七种取值下所取导模为同一根导模, 位于相同光子带隙范围内, 而且随着缺陷介质柱半径增大, 导模向低频移动, 群速度先减小后增大, 带边特性也越来越差. 从图 11(b) 中可以看出, 群速度最小值位于 $R_j = 0.24a$ 时, 定义为点 P , 计算可得 $S = 5.89 \times 10^{-4}$, 大约是普通 7×7 超胞结构 PhC CCW 的 $1/5$.

对于 N 点, 我们取其左右两边 $0.07a$ — $0.13a$ 的范围研究, 间隔为 $0.01a$, 得到其群速度曲线如图 12 所示. 其中选用了两个不同导模, $0.07a$ — $0.09a$ 为同一导模, $0.10a$ — $0.13a$ 为另一导模. 图中看出, 群速度最小值仍然位于 $R_k = 0.10a$ 处, 即点 N . 对于两个导模来说, 均随着点缺陷半径的增大向低频移动. 综上可得, 在 P 点处的 PhC CCW 结构具有最小的群速度.

4. 结 论

本文基于目前光通信领域对全光缓存器的热门

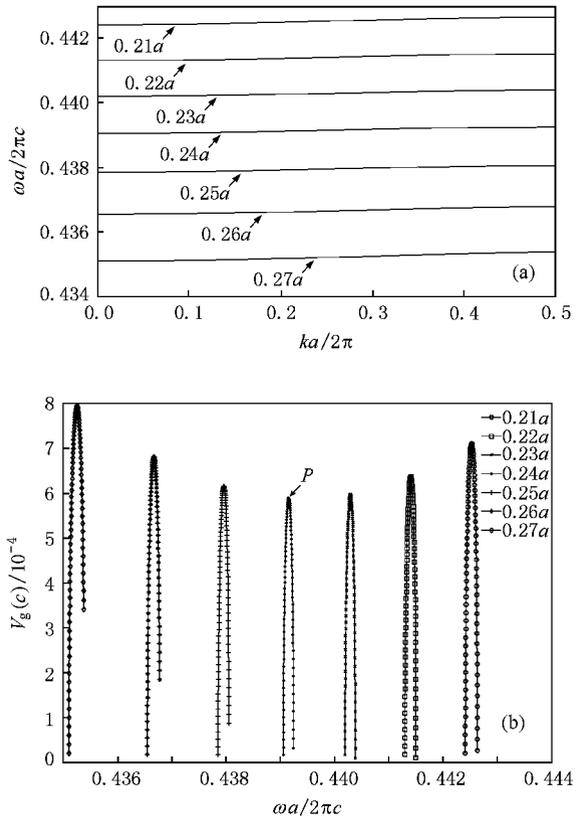


图 11 $R = 0.2a, R_k = 0.1a, R_j$ 由 $0.21a$ 变化到 $0.27a$ 时 (a) 导模曲线 ($M = 7, N = 7$) 及 (b) 群速度曲线

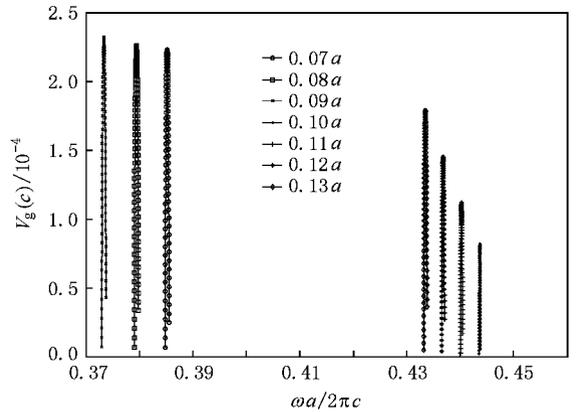


图 12 $R_j = R = 0.2a, R_k$ 从 $0.07a$ 变到 $0.13a$ 时的群速度曲线

研究, 对可用于实现全光缓存的光子晶体耦合腔波导慢光结构进行了详细分析和仿真设计. 通过对普通 PhC CCW 结构的研究发现, 随着点缺陷之间晶格个数增加, 腔模耦合大幅减弱, 导致光传输速度受到影响, 使得群速度 v_g 减小很快. 选用 7×7 超胞单元的 CCW 结构的导模最大群速度 v_{g-max} 只有 $3.33 \times$

$10^{-3}c$ 约为光子晶体线缺陷波导的 $1/251$. 然后选取 7×7 超胞单元做为研究对象, 分四种情况对其点缺陷腔周围四个介质柱半径进行了调整, 最后得到的新型结构的最大慢光群速度可达到 $5.89 \times 10^{-4}c$, 大约是普通 7×7 超胞结构 PhC CCW 的 $1/5$, 该结果优于文献[17]中得到的最小值 $1 \times 10^{-3}c$. 另外, 当改变上下相邻两个介质柱半径时, 这种结构的导模具有更小的群速度和更好的带边特性, 因此具有更高

的应用价值. 相比其他慢光结构, 本文中设计的新 PhC CCW 结构具有更好的慢光特性. 对于改变后光子晶体波导结构具有更慢的群速度的原因, 我们认为主要是由于相邻两个缺陷腔距离增大以及缺陷腔周围结构改变之后, 使得缺陷腔的品质因子 Q 值增大的缘故. 下一步工作将结合具体参数条件, 对带边移动的机理以及结构变化对缺陷腔 Q 值的影响进行深入研究.

- [1] Almeida R, Pelegriani J, Waldman H 2005 *Commun. Lett.* **9** 175
- [2] Fayoumi A, Jayasumana A P 2007 *IEEE/ACM Trans. Netw.* **15** 226
- [3] Tucker R S, Ku P C, Chang-Hasnain C J 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 4046
- [4] Tucker R S, Ku P C, Chang-Hasnain C J 2005 *Electron Lett.* **41** 61
- [5] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [6] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [7] Yu T B, Liu N H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3049 (in Chinese) [于天宝、刘念华 2004 物理学报 **53** 3049]
- [8] Feng L J, Jiang H T, Li H Q, Zheng Y W, Chen H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2102 (in Chinese) [冯立娟、江海涛、李宏强、张冶文、陈 鸿 2005 物理学报 **54** 2102]
- [9] Vlasov Y A, Boyle M O, Hamann H F *et al* 2005 *Nature* **438** 65
- [10] Gersen H, Karle T J, Engelen R J P *et al* 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 073903
- [11] Du X Y, Zheng W H, Ren G, Wang K, Xing M X, Chen L H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 571 (in Chinese) [杜晓宇、郑婉华、任刚、王 科、邢名欣、陈良惠 2008 物理学报 **57** 571]
- [12] Petrov A Y, Eich M 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4866
- [13] Zhang B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1857 (in Chinese) [张 波 2006 物理学报 **55** 1857]
- [14] Poon J K S, Scheuer J, Xu Y, Yariv A 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 1665
- [15] Tanabe T, Notomi M, Kuramochi E *et al* 2007 *Opt. Express* **15** 7826
- [16] Altuga H, Vuckovic J 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 111102
- [17] Svaluto Moreolo M, Morra V, Cincotti G 2008 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **10** 064002

Research on new type of slow light structure based on 2D photonic crystal coupled cavity waveguide^{*}

Lu Hui[†] Tian Hui-Ping Li Chang-Hong Ji Yue-Feng

(*Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China*)

(Received 10 July 2008; revised manuscript received 1 August 2008)

Abstract

The structure of 2D rods PhC CCW is studied, and it is found that the group velocity decreases quickly with the increase of lattice number between two rod defects. When 7×7 supercell unit is chosen, the largest group velocity $\nu_{g-\max}$ of the guided mode is about 1/251 times that of photonic crystal line defect waveguide. Radius of the four rods around the cavity of the 7×7 supercell unit are adjusted, $\nu_{g-\max}$ of the new structure can reach $5.89 \times 10^{-4} c$, and it's about 1/5 that of unadjusted structure. Finally, by making comparisons, it is found that the structure has the best slow-light characteristic when the radius of the up and down rods are changed.

Keywords : photonic crystal (PhC), coupled cavity waveguide (CCW), slow light, guided mode

PACC : 7820P, 4282

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60707001, 60711140087), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB310705), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA01Z247), Program for New Century Excellent Talents in University (Grant No. NCET-07-0110), Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (Grant No. IRT0609), International S&T Cooperation Program of China (Grant No. 2006DFA11040).

[†] E-mail : hptian@bupt.edu.cn, yihui18@126.com