

doi:10.3788/gzxb20154402.0223001

耦合腔光子晶体慢光波导结构

董小伟, 权炜, 刘文楷

(北方工业大学 信息工程学院, 北京 100144)

摘 要:在单线缺陷结构中引入两个附加的相邻介质柱, 构成一种新型的光子晶体耦合腔波导结构. 通过平面波展开法对波导结构的慢光特性进行了仿真分析, 研究了平移线缺陷上下两侧介质柱, 以及改变腔体的长度对器件色散特性和群速度的影响. 结果表明: 与平移缺陷上下两侧介质柱相比, 通过改变腔体的长度, 不仅可将光群速度低到 $0.03c$ (c 为真空下的光速), 而且器件的有效波长范围接近 20 nm. 利用时域有限差分法得到波导结构的传输场分布图, 研究波长的选取对入射激励光在光子晶体耦合腔波导中传输场的影响, 发现结构参量优化后的光子晶体耦合腔波导仍然具有良好的传输特性.

关键词:慢光; 群速度; 带宽; 光子晶体波导; 耦合腔

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)02-0223001-4

Investigation on Slow Light in Photonic Crystal Coupled-cavity Waveguide

DONG Xiao-wei, QUAN Wei, LIU Wen-kai

(College of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: A slow light photonic crystal coupled-cavity waveguide by introducing two additional holes into the single line-defect structure was proposed. The characteristics of slow light in the coupled-cavity waveguide were investigated with Plane Wave Expansion (PWE) method. Influences of the boundary rows shift and the coupled-cavity length on the dispersion and the group velocity of device were studied. Compared with the boundary rows shift method, the group velocity is reduced to $0.03c$ (c is the light velocity in vacuum) by modifying the coupled-cavity, meanwhile the effective wavelength range is close to 20nm. Finally, the transmission field distribution under different incident wavelength was analysed with Finite Difference Time Domain (FDTD) method. A good transmission character of the proposed structure is verified by researching transmission field distribution under different incident wavelength in photonic crystal coupled cavity waveguides.

Key words: Slow light; Photonic crystal waveguide; Group velocity; Bandwidth; Coupled cavity

OCIS Codes: 230.7370; 230.5298; 210.4810; 260.2030

0 引言

由于慢光技术在光缓存^[1]、光存储^[2]、光信息处理方面^[3-4]的广泛应用, 成为光学领域的研究热点. 光子晶体与其它可以实现慢光的介质相比, 具有体积小、便于与光通信器件集成^[5-6]、结构设计灵活、可在任意波长上实现慢光^[7-8]等优点. 与计算复杂度过高而难以制

作的三维光子晶体相比, 二维光子晶体制作相对简单, 应用较广^[9], 因此基于二维光子晶体的慢光具有良好的应用前景.

利用二维光子晶体实现慢光的研究主要有: 二维线缺陷波导和耦合腔波导. 对于线缺陷波导, 利用其边带平坦特性, 通过调节波导结构参量便可获得慢光效应, 然而群速度特性较差; 而光子晶体耦合腔波导, 通

基金项目:北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划(No. CIT&TCD201304001)、北京市委组织部优秀人才项目(No. 2012D005002000001)和北方工业大学科研人才提升计划项目(No. CCXZ201307)资助

第一作者:董小伟(1978-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信与光电子器件. Email: way7803@163.com

通讯作者:权炜(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光子晶体慢光器件. Email: 1067141523@qq.com

收稿日期:2014-09-09; **录用日期:**2014-10-15

<http://www.photon.ac.cn>

过调整腔间的距离或腔周围结构,可实现较大幅度的光速减慢. Ran Hao 和 Eric Cassan 对单线缺陷波导结构与与缺陷相邻空气孔的位置与尺寸参量进行动态调制^[10],得到较原结构相比更小的群速度,但作为代价慢光有效频带大幅下降. 杨毅彪^[11]在完整三角晶格光子晶体中周期性地引入点缺陷,形成蜂窝状的光子晶体耦合腔波导结构,产生波长范围 15 nm 以上的慢光,但其群速度高达 $0.15c$ (c 为真空的光速);肖国宏等^[12]在完整三角晶格光子晶体中引入单个点缺陷后,只保留点缺陷以及围绕该点缺陷的三层介质柱,形成圆形微腔结构,将群速度降低至 $5.86 \times 10^{-4}c$,缺点是波长范围不足 2 nm. 因此,减小群速度与增加带宽存在矛盾关系.

本文以二维三角晶格光子晶体耦合腔波导为研究对象,结合平面波展开法 (Plane Wave Expansion Method, PWE) 及时域有限差分法 (Finite Difference Time Domain Method, FDTD) 对耦合腔波导在不同结构参量下的慢光与传输特性进行分析. 通过合理选取结构参量,实现光子晶体耦合腔波导的低群速度和高带宽.

1 二维三角晶格光子晶体耦合腔波导的能带与群速

二维三角晶格光子晶体耦合腔波导结构如图 1,介质柱折射率 $n=3.46$ (近似为半导体硅或钢磷材料在近红外波段的折射率),晶格常量 $a=0.541\mu\text{m}$,介质柱半径 $r=0.4a$,背景为空气. 在完整光子晶体的中间引入一条线缺陷,然后在线缺陷中等间距的加入介质柱,形成沿 y 方向周期排列的相邻微腔结构,每个腔体的长度为 L ,相邻腔体间的介质柱数为 N .

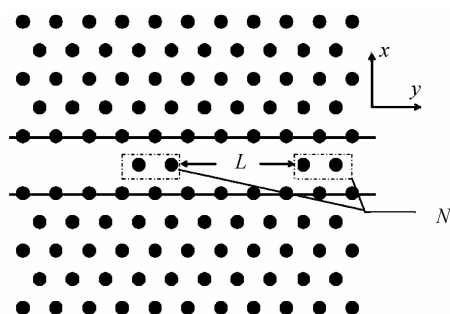


图 1 二维三角晶格介质柱光子晶体耦合腔波导结构
Fig. 1 Structure of 2D triangular rods photonic crystal coupled cavity waveguide

能带色散是衡量光子晶体波导慢光特性的重要指标. 对于耦合腔波导结构,调整靠近耦合腔的介质柱结构参量,可以改善光子晶体的能带色散曲线. 图 2 研究了耦合腔体间附加介质柱的数目 N 对波导结构色散特性的影响. 当 $N=0$ (即未加入介质柱,仅为线缺陷光子晶体波导)时,色散曲线变化趋势较为剧烈,没有满足实

理想慢光所要求的数值平稳区域;当在线缺陷中附加介质柱形成耦合腔光子晶体波导时,随着所加介质柱数 N 的增加,色散曲线大幅上移,曲线首部与尾部的数值变化非常缓慢,色散曲线接近理想的座椅状能带,即存在平坦区域,色散曲线在该区域内的数值几乎不发生改变,曲线斜率很小,根据群速度与能带的关系式 $v_g = d\omega/dk$ (ω 为波导中所传输光波的角频率, k 为沿波导方向的波矢)^[13-14] 可以计算对应的导模群速度,由于关系式为矢量式,因此利用该式进行数据差分处理时需要对计算结果取绝对值,得到导模群速度. 色散曲线中越平坦的部分对应的群速度越小,越陡峭的部分对应的群速度越大,这一点与文献^[14]一致. 然而若所附加的介质柱数量超过一定限额,色散曲线的平稳区域会发生上翘,又将导致群速度增大及慢光性能的恶化. 因此,为使色散曲线出现比较平稳的座椅状能带,实现较好的慢光特性,当附加介质柱数 $N=2$ 时较为合适.

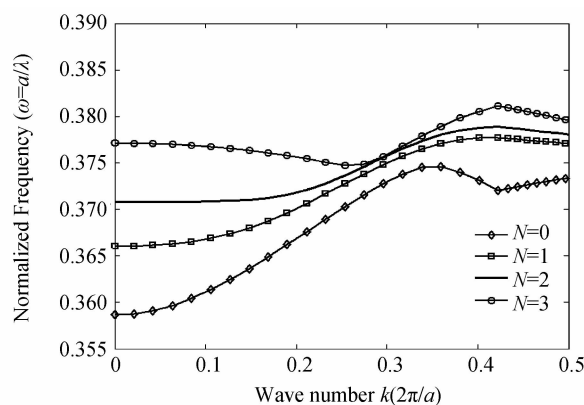
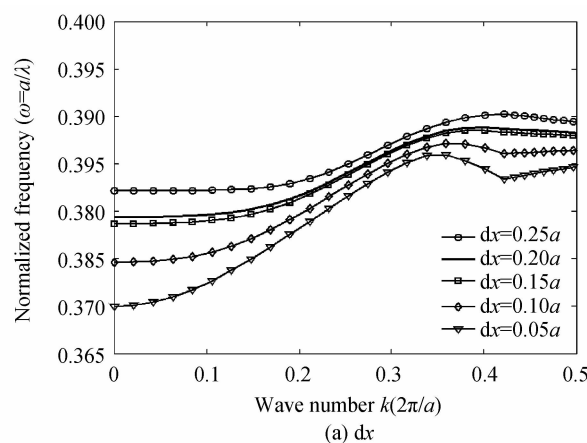


图 2 色散特性曲线随腔体间介质柱数量的关系
Fig. 2 Relationship of the dispersion curves with the number of rods between adjacent cavities

保持 y 方向不变,沿 x 方向平移线缺陷耦合腔上下两侧的介质柱,当平移量 dx 分别取 $0.05a, 0.10a, 0.15a, 0.20a, 0.25a$ 时,如图 3(a)所示,随着平移量 dx 的增加,能带逐渐上移,曲线发生弯折,在 $dx=0.20a$ 时色散曲线表现出较为理想的座椅状能带. 接下来保持 $dx=0.20a$,沿 y 方向平移线缺陷耦合腔上下两侧的介质柱,当平移量 dy 分别取 $0.1a, 0.2a, 0.3a, 0.4a, 0.5a$,



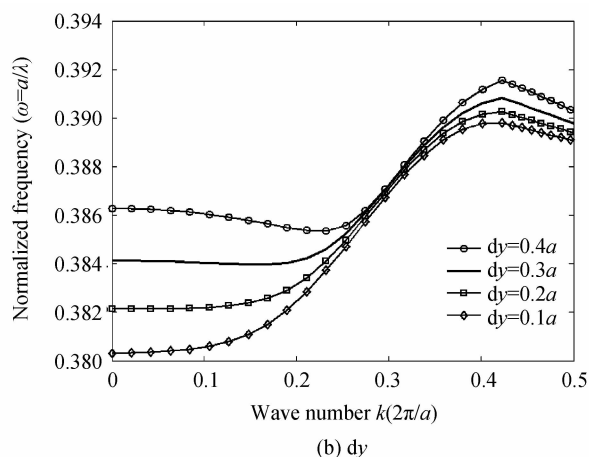


图3 色散特性曲线随不同结构参数的变化关系
Fig. 3 Relationship of the dispersion curves with different parameter

从图3(b)可以看出,虽然 dy 取值增幅明显高于 dx ,但色散曲线的变化却很小,说明相对于 y 方向介质柱的平移,色散特性对 x 方向介质柱的平移更为敏感.这是因为,沿 x 方向平移介质柱会改变相邻两排介质柱的间距,使整个光子晶体的介质柱密度发生改变,导致光子晶体波导有效折射率增加,从而改善能带色散曲线.优化后光子晶体耦合腔波导色散特性结构参数为 $N=2$, $dx=0.2a$, $dy=0.3a$.图4为群速度曲线随腔体长度 L 的变化,当腔体长度 L 增加时,群速度曲线的峰值先减小后增大,当腔体长度 $L=4a$ 时可以获得最小群速度,实现最佳慢光效果.同时发现,在调节腔体长度 L 降低群速度的过程中,有效带宽基本保持不变,在腔体长度从 $L=2.5a$ 调整到 $L=4.5a$ 的过程中,结构能带色散曲线的形状几乎没有变化,说明通过改变腔体长度 L ,可以在降低群速度的同时,保持较好的带宽和色散特性.由图4可以看出,慢光的有效带宽约 0.006ω ,波长范围接近20 nm.

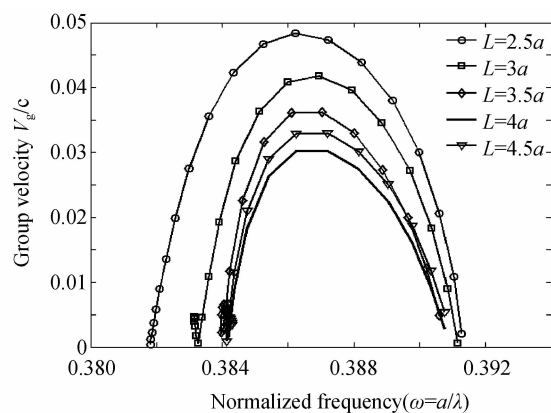


图4 群速度特性曲线随腔体长度 L 的变化关系
Fig. 4 Relationship of the group velocity curves with the length of the cavity L

2 二维三角晶格光子晶体耦合腔波导的传输特性

在实际应用中,光子晶体慢光器件不仅要具有良好慢光性能,还应允许指定波长的入射光在结构内高效传输.根据透射系数 $T(\omega) = \sum P_{ex} / \sum P_{in}$,使用时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD),选取文献[15]所报道的脉冲波作为激励源,优化结构后二维三角晶格光子晶体耦合腔波导的透射谱见如图5.

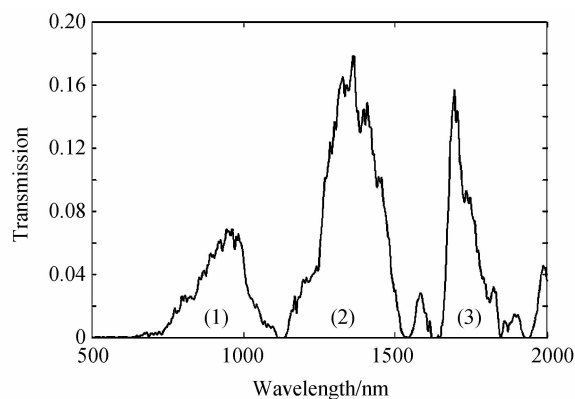


图5 当结构参数为 $N=2$, $dx=0.2a$, $dy=0.3a$, $L=4a$ 时,耦合腔波导的透射谱

Fig. 5 Transmission spectrum of the coupled cavity waveguide obtained for $N=2$, $dx=0.2a$, $dy=0.3a$, $L=4a$

为了研究特定波长下光在波导结构内的传输特性,分别选取透射谱(1)、(2)、(3)区域中的波长作为入射波长,采用单色正弦波作为激励源,将激励波源设置在波导入口,探测点设置在波导出口,时间步长固定为5000.图6(a)~(d)分别为入射激励光波长 $\lambda=550$ nm, $\lambda=950$ nm, $\lambda=1750$ nm, $\lambda=1450$ nm时,光在优化结构二维三角晶格光子晶体耦合腔波导中传输的场分布图.从图6(a)可以看出,当入射激励光波长位于图5所示(1)、(2)、(3)区域之外时,光在传输过程中由于受到微腔间介质柱的阻拦,产生了极大反射和散射,能量大大损耗,几乎无法通过光子晶体.当入射激励光波长位于图5所示(1)或(3)区域时,如图6(b)和图6(c)所示,虽然光可以通过微腔间介质柱并沿着线缺陷方向传播,但传输过程中会向四周发散,传输损耗仍很大,不利于在实际中应用.而只有当入射激励光波长位于图5所示(2)区域时,如图6(d)所示,光会在散射极小的情况下沿线缺陷方向传播,并无阻碍地通过相邻微腔间的介质柱.同时该波长区域正好位于图4所示慢光中心区域,这与文献[14]所报道的结果相一致,也就是,使入射激励光沿缺陷方向不分散地通过光子晶体的波段总是与该光子晶体结构慢光的有效波段重叠.在线缺陷中加入介质柱并没有破坏光子晶体的传输特性.这是因为所加入的介质柱虽然改变了二维线缺陷光子晶体波导的原

有结构,但只要波长选取在慢光区域,当入射激励光在光子晶体中传输时,各腔体之间的光场会产生很强的耦合效应,从而保证了该光子晶体波导结构不仅具有良好的慢光特性,而且具有较低的传输损耗。

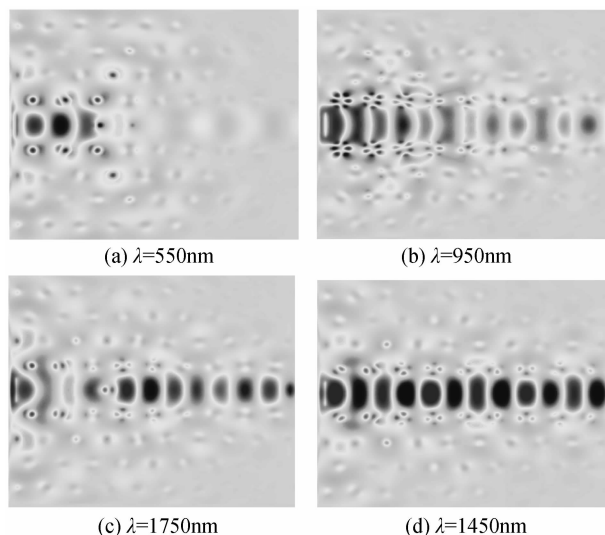


图6 不同波长 λ 下入射光在光子晶体耦合腔波导中的传输场分布情况

Fig. 6 Transmission field distribution under different incident wavelength λ in photonic crystal coupled cavity waveguides

3 结论

本文分析了二维三角晶格光子晶体耦合腔波导中结构参量对光子晶体慢光特性的影响.结果表明:通过改变耦合腔体间介质柱的数目以及线缺陷耦合腔上下两侧介质柱的平移量,色散曲线可以表现出平稳的座椅状态;调整腔体的长度可以在保持有效带宽基本不变的同时,获得群速度 $0.03c$ 且波长范围接近 20 nm 的慢光.此外,通过对不同波长下入射激励光在光子晶体耦合腔波导中的传输场分布情况的研究,证明在对结构参量进行优化后的光子晶体耦合腔波导仍然具有良好的传输特性。

参考文献

- [1] JAGERSKA J, THOMAS N L, ZABELIN V, *et al.* Experimental observation of slow mode dispersion in photonic crystal couple-cavity waveguides[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(3): 359-361.
- [2] SHI Jun, LIU Yong-ke, LIN Xu-biao, *et al.* A new-type two-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 940-943.
史军,刘勇科,林旭彪,等.一种衍生于三角晶格的二维光子晶体[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 940-943.
- [3] ZHAN Yi, ZHEN Yi, XU Yun-feng. Optimal design for two dimensional square lattice dielectric cylinder photonic crystal waveguides[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1130-1133.
詹仪,郑义,徐云峰.二维介质柱光子晶体波导的优化设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 1130-1133.
- [4] JUNTAO L, THOMAS P W, FAOLAIN L O, *et al.* Systematic design of flat band slow light in photonic crystal

- waveguides[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(9): 6227-6232.
- [5] QU Lian-jie, YANG Yue-de, HUANG Yong-zhen. Slow-light characteristics of photonic crystal waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **31**(1): 0113002.
曲连杰,杨越德,黄永箴.光子晶体波导慢光特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0113002.
- [6] LENG F C, LIANG W Y, LIU B, *et al.* Wideband slow light and dispersion control in oblique lattice photonic crystal waveguides[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(6): 5709-5712.
- [7] WANG Dao-bin, ZHANG Jie, ZHAO Yong-li. Enhanced slow light propagation in photonic crystal waveguides using angular properties of scatter elements [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**(12): 122301.
- [8] LI Xin, YANG Ming, GUO Shi-liang, *et al.* Characteristics of photonic-crystal waveguide with random media [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(10): 1006001.
李欣,杨明,郭世亮,等.含随机介质的光子晶体波导特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 1006001.
- [9] HOU J, GAO D, WU H, *et al.* Wideband slow light in chirped slot photonic crystal coupled waveguide[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(10): 10567-10580.
- [10] HAO R, CASSAN E, KURT H, *et al.* Novel slow light waveguide with controllable delay-bandwidth product and ultra-low dispersion[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(6): 5942-5950.
- [11] YANG Yi-biao. Numerical simulation of the photonic bandgap of two dimensional photonic crystals with kagome lattice[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 725-727.
杨毅彪.二维Kagome格子光子晶体禁带的数值模拟[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 725-727.
- [12] XIAO Guo-hong, FU Jun-mei, FENG En-xin. Influences of structure parameters of triangular lattice photonic crystal with defect on eigen mode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 725-728.
肖国宏,傅君眉,冯恩信.具有缺陷结构的三角形二维光子晶体结构参量对本征模的影响[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 725-728.
- [13] LI Chang-hong, TIAN Hui-ping, LU Hui, *et al.* Effect of waveguide basic structure on slow light in photonic crystal coupled resonator optical waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **30**(7): 2109-2114.
李长红,田慧平,鲁辉,等.波导基本结构对光子晶体耦合腔光波导慢光特性的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2109-2114.
- [14] LU Shu-yuan, ZHAO Jian-lin, ZHANG Dong. Slow light transmission in two-dimension square photonic crystal waveguide [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **31**(1): 01130011.
吕淑媛,赵建林,张栋.二维正方光子晶体波导中的慢光传输[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2224-2228.
- [15] BABA T. Slow light in photonic crystal [J]. *Nature Photonics*. 2008, **2**(8): 465-472.
- [16] RAN Hao. Improvement of delay-bandwidth product in photonic crystal slow-light waveguides[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(16): 16309-16319.
- [17] YIN Jian-ling, HUANG Xu-gang, LIU Song-hao, *et al.* Effect of the structure shape on the 8-fold photonic quasicrystals [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(2): 567-571.
殷建玲,黄旭光,刘颂豪,等.介质柱形状对准晶光子晶体带隙特性的影响[J]. *中国激光*, 2010, **39**(2): 567-571
- [18] ZHANG Dong, ZHAO Jian-lin, LU Shu-yuan. Slow light waveguide with low group-velocity dispersion and low loss in 2-D photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **31**(1): 01130011.
张栋,赵建林,吕淑媛.低群速度色散和低损耗的二维光子晶体慢光波导[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 01130011.