

低群速度色散和低损耗的二维光子晶体慢光波导

张 栋 赵建林 吕淑媛

(西北工业大学理学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 空间应用物理与化学教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 利用平面波展开(PWE)法分析了慢光在由介质柱和空气背景构成的二维三角晶格光子晶体耦合微腔波导中的传播特性。数值模拟结果表明,随着缺陷腔之间距离的增大,导模的群速度减小很快;兼顾色散和损耗的影响,当相邻微腔间距两倍于晶格常数时,耦合微腔波导单位厚度(mm)透射比为 47%,带宽为 1.97 GHz,导模有效群折射率为 22.4,通过对波导的群速度色散(GVD)特性进行分析,发现慢光区域的群速度色散的数量级低至 10^{-2} ,具有较好的慢光特性,能够保证光波的高效传输。基于这种结构的耦合微腔波导提出了一种低损耗的光延迟器结构,计算表明该结构可实现的延迟时间为 9.4 ps,光传输损耗低于 1 dB。

关键词 光子晶体;耦合微腔波导;群速度;群速度色散;慢光

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0113001

Slow Light Waveguide with Low Group-Velocity Dispersion and Low Loss in 2-D Photonic Crystal

Zhang Dong Zhao Jianlin Lü Shuyuan

(Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract An analysis on the transmission properties of the light in 2-D photonic crystal coupled cavity waveguide (CCW) with triangular lattice structured by columned media and air background is presented using plane wave expansion (PWE) method. The numerical simulation results show that, the group velocity of the guide mode decreases quickly with increasing the distance between the defect cavities. Considering both the dispersion and loss of the CCW, it was found that when the distance between the defect cavities is taken as double of the lattice constant, the transmittance per mm of the CCW, the bandwidth and the effective group refractive index would be 47%, 1.97 GHz and 22.4, respectively. The property of group-velocity dispersion (GVD) of the slow light was analyzed. It is found that the magnitude of the GVD value in the area of slow light is 10^{-2} , meaning that the structure has the best slow-light characteristic and allow the slow light propagate efficiently. Based on this CCW structure a low loss optical delayer was proposed, the calculation results show that this delayer is able to achieve a delay time of 9.4 ps and a loss of lower than 1 dB.

Key words photonic crystal(PC); coupled cavity waveguide; group velocity; group-velocity dispersion(GVD); slow light

OCIS codes 130.5296; 050.5298

1 引 言

光子晶体(PC)^[1]作为一种折射率呈周期性分布的介质材料,由于可以通过结构设计来调制光子态密度和色散曲线,在集成光学方面具有广阔的应

用前景^[2~4]。如在完整的光子晶体中移除一行介质柱(格点),形成线缺陷波导,禁带中将会产生一个或多个导模。这种导模一般带宽较窄,并且由于背景为光子禁带,使得在小频率范围内介质的折射率发

收稿日期: 2010-03-08; 收到修改稿日期: 2010-06-02

基金项目: 西北工业大学基础研究基金(JC200950)资助课题。

作者简介: 张 栋(1984—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体慢光波导方面的研究。E-mail: zd1533@163.com

导师简介: 赵建林(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光信息技术及应用等方面的研究。

E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn(通信联系人,中国光学学会高级会员;S0404206575)

生急剧变化,符合实现大幅度光速减慢的条件,即形成慢光。慢光效应可应用于光延迟器和光缓冲器^[5~6]等,并且还可以在某些非线性光学过程中用于相对增强光与物质的非线性^[7~8]相互作用效果。

目前,关于利用光子晶体实现慢光的研究,多集中于二维光子晶体线缺陷波导^[9~14]或耦合微腔波导(CCW)^[15~19]。对于线缺陷波导,利用其带边平坦特性,通过调节光子晶体波导的各项结构参数,便可以获得令人满意的慢光效应。对于CCW,通过调整两腔之间的距离或改变腔周围的结构,则可以大幅度减小群速度,从而实现较大幅度的光速减慢。由于光在耦合微腔波导中的传播是基于微腔之间的耦合效应,如果微腔之间的距离过大,耦合效率很难达到很高,光脉冲在传播很短的一段距离后,就会衰减到很小以至于无法检测。因此,在设计耦合微腔波导延迟器件时,必须考虑光波的损耗。

本文主要分析在二维三角晶格的光子晶体CCW中,结构参数对光波的群速度、群速度色散(GVD)及损耗的影响,并据此对其结构进行调整,以获得具有低色散低损耗慢光导模,实现更好的慢光传播,进而基于结构优化的CCW提出一种低损耗的光延迟器结构设计。

2 二维三角晶格光子晶体耦合微腔波导中的慢光分析

图1所示为由介质柱构造的以空气为背景介质

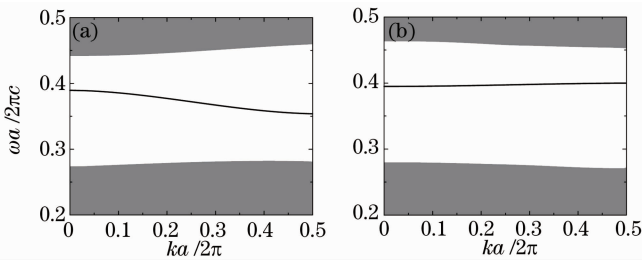


图2 不同结构光子晶体CCW的带隙及色散曲线。(a)~(d)超原胞选取分别为 $9 \times 2, 9 \times 3, 9 \times 4$ 和 9×5

Fig. 2 Bandgaps and dispersion relations of different PC-CCW structures. (a)~(d) the supercells of with size $9 \times 2, 9 \times 3, 9 \times 4$ and 9×5 , respectively

利用图2中的色散关系及(1)式,可以得到光在CCW中传播的群速度,如图3所示。可以看出,随着 N 的增大,最大群速度迅速减小;当 $N=2$ 时,最大群速度仍然较大,超过 $0.2c$;当 $N>3$ 时,最大群速度降低到 $0.05c$ 以下,对光传播有明显的减慢。中心频率随着 N 的增大向高频方向移动,与正方晶格结论一致^[18]。但群速度迅速降低所带来的后果是有效带宽迅速减小,并且由于耦合腔间距的增加,耦

合效率也会降低。

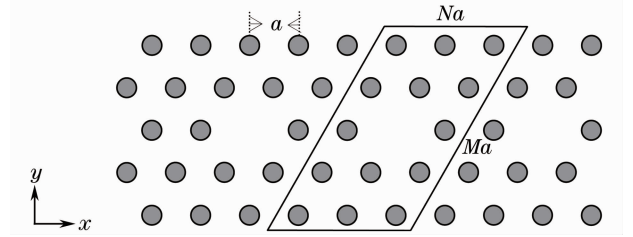
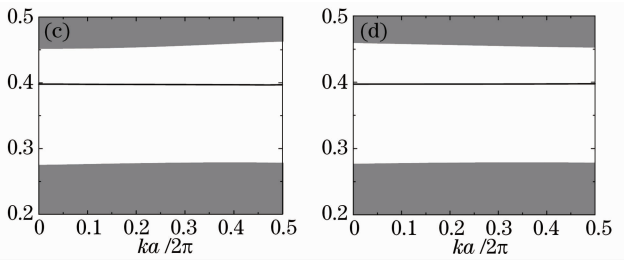


图1 典型的三角晶格光子晶体CCW结构示意图($N=3, M=5$)

Fig. 1 Typical structure of 2-D triangular lattice PC CCW ($N=3, M=5$)

考虑到介质柱结构二维三角晶格光子晶体的TM模带隙比较明显,故利用平面波展开法分析其TM缺陷模的色散曲线。假设介质柱半径 $R=0.2a$,光波沿着 x 方向传播。当 $M=9, N=2, 3, 4, 5$ 时(当 N 改变时,每个超原胞单元只包含一个耦合腔),可得到图2所示导模色散曲线,横轴为波矢,纵轴为归一化频率。可以看出,每种情况下带隙中均存在一个导模,由于缺陷腔之间的耦合作用,使得光在波导中传播,且随着 N 的增加,导模变得越来越平坦,意味着群速度越来越小。群速度的计算公式为

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



合效率也会降低。

图4为光波在不同CCW中传播时的相对模场分布图,图中取晶格常数 $a=600$ nm,其余参数与图1相同。考虑到 $N=2$ 时慢光效应并不明显,因此主要讨论 $N=3, 4, 5$ 时的情况。从图中可以看出,大部分光能量被局域在微腔中,说明光波是利用微腔间的耦合作用向前传播的,微腔邻近的区域仍有部分光场分布,改变此区域的光子晶体结构将改

变光场的分布,进而可以改变光子晶体波导的性质。靠近端面的两个截面为计算能流密度的截面,通过

计算两个截面上的能流密度之比,就可以得到光波在 CCW 中的传输损耗。

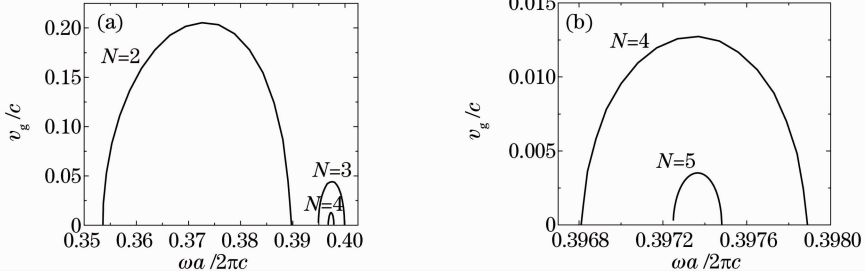


图 3 不同结构 PC-CCW 导模的群速度

Fig. 3 Group velocity of guided modes in different PC-CCW structures

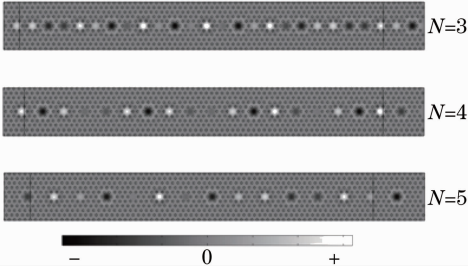


图 4 光波在不同结构 CCW 中的相对模场分布
Fig. 4 Relative mode-field distribution of light in different PC-CCW structures

图 5 为 $N=3, 4, 5$ 时群速度与透射比与波长的关系。从图中可以看出,随着 N 的增加,透射比逐渐降低。对于结构确定的情况,在导模的带边,群速度较低,甚至无限接近于零。但带边的损耗较大,如当群速度接近于零时,透射比也接近于零。因此,设计 CCW 器件时,应该尽量使器件的工作波长位于 CCW 的中心波长处,这样可以有效降低损耗。而通过对 CCW 结构的优化设计^[18,19]或利用电光效应^[20],可以调节 CCW 的中心波长,使中心波长位于通讯波段内,便于实际应用。

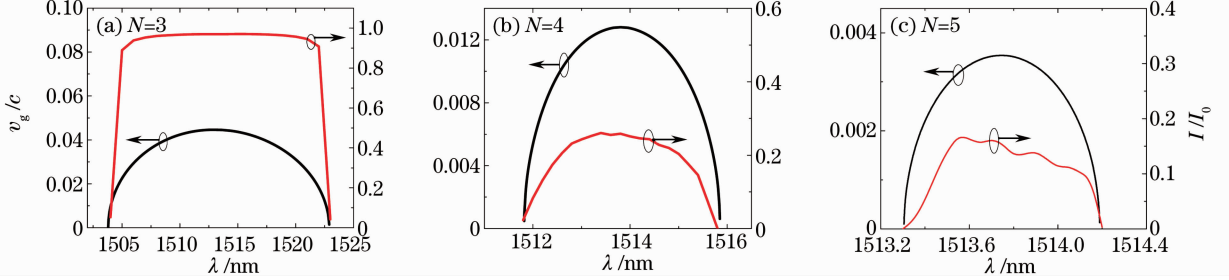


图 5 光波在不同结构 CCW 中的群速度与透射比

Fig. 5 Group velocity and transmittance of light in different PC-CCW structures

GVD 的计算公式为

$$\beta = \frac{d^2 k}{d\omega^2} = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{1}{\frac{d\omega}{dk}} \right) = - \frac{1}{\left(\frac{d\omega}{dk} \right)^3} \frac{d^2 \omega}{dk^2} = - \frac{1}{v_g^3} \frac{d^2 \omega}{dk^2}, \quad (2)$$

由(2)式可以看出,GVD与群速度的三次方成反比。当群速度趋于零时,GVD将趋于无穷大,光脉冲在这样的波导中传播一段距离后将会展宽,导致两个相邻的脉冲出现重叠,这必然不利于光信号的传输。图 6 为 $N=3, 4, 5$ 时群速度、GVD 与波长的关系。可以看出,对 CCW,存在一个二阶色散较小的区域,即对应的群速度变化较为缓慢,在该区域 CCW 是低群速度低色散波导,具有优良的慢光特性。改变

CCW 结构参数,可以降低波导的最大群速度,但会导致波导的二阶色散剧烈变化,低群速度低色散区域范围变小,有效带宽变窄。这表明减小群速度与增加有效带宽存在矛盾,因此,应该选择有效带宽^[11][即 $B=(\Delta\omega/\omega)n_g$]较大的波导。 $\Delta\omega$ 为群速度相对最大群速度变化小于 $\pm 10\%$ 的区域, ω 为中心圆频率, n_g 为最大群速度的倒数。

分别计算了三种结构的有效带宽 B , 得到 $B(N=3)=0.152, B(N=4)=0.116, B(N=5)=0.087$ 。综合图 5 与 6 可得出,当 $N=3$ 时,CCW 具有较低的损耗,较大的带宽,同时具有相对较低的群速度,其每毫米厚度透射比为 47%,带宽为 1.97 GHz,有效群折射率为 22.4。相比一般的线缺陷波导^[9,14],CCW 不需要进行复杂的结构设计就

可以实现更低的 GVD, 数量级低至 10^{-2} , 因此 CCW 有广阔的应用前景。

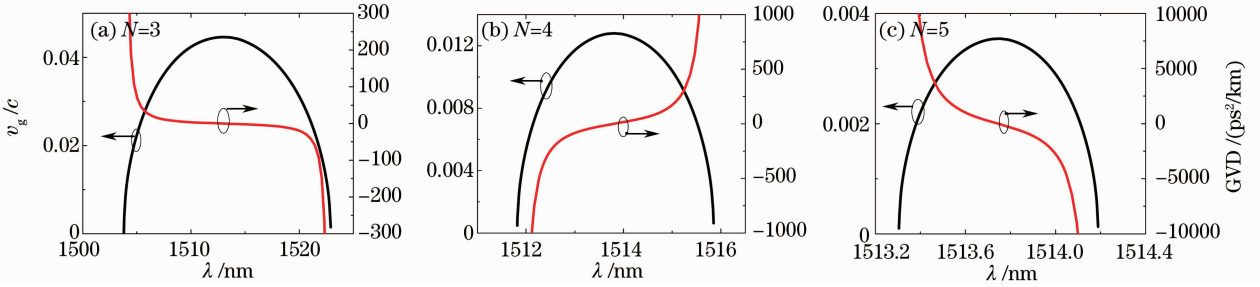


图 6 光波在不同结构 CCW 中的群速度与 GVD

Fig. 6 Group velocity and GVD of light in different PC-CCW structures

3 光延迟器的设计

对 $N=3$ 结构的 CCW, 其光信号延迟时间与透射比的关系如图 7 所示。可以看出, 随着延迟时间的增加, 光波在 CCW 中的损耗迅速增大。因此, 在利用 CCW 结构设计光延迟器时, 应综合考虑延迟时间与损耗的关系。

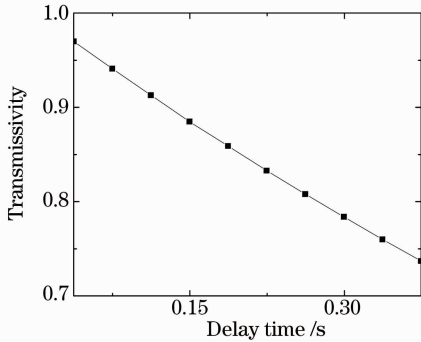


图 7 光信号延迟时间与透射比的关系

Fig. 7 Relationship of delay time and transmittance in CCW

基于上述讨论, 利用 $N=3$ 结构的 CCW 设计了一种光延迟器, 其结构如图 8 所示, 晶格常数仍取 600 nm , 延迟器尺寸为 $48\text{ }\mu\text{m} \times 8.3\text{ }\mu\text{m}$ 。由于光波通过光子晶体波导弯折时损耗很小^[21], 所以利用三个 120° 折角使波导形成一个 180° 的变向, 用尽可能小的空间实现较大的光信号延迟。但由于微腔之间的耦合效应, 若两排平行的波导相距过近, 则有一部分光能量会耦合进下一排波导, 对光信号产生干扰。根据计算, 当 $N=5$ 时, $48\text{ }\mu\text{m}$ 长的波导对光能量的透射比低于 20% ; 而当微腔间距为 $6a$ 时, 同样长度波导的透射比已经低于 1% , 意味着微腔间的耦合效应已经很弱, 因此选取平行波导的间距为 $6a$, 既可以充分利用空间, 又可以避免光信号之间的干扰。

经计算, 得到这种结构光延迟器的相对模场分布如图 9 所示, 其对波长为 1513 nm 的光信号延迟时间为 9.4 ps , 透射比超过 90% 。同样, 如果利用图 4 中 $N=5$ 结构的波导设计直线型光延迟器, 则在 $48\text{ }\mu\text{m}$ 距离上对波长为 1513.8 nm 的光信号延

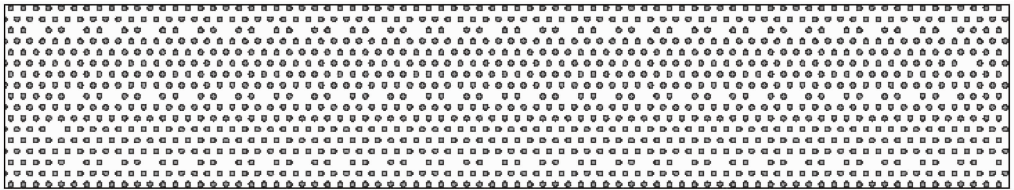


图 8 光延迟器结构示意图

Fig. 8 Structure of the proposed optical delayer

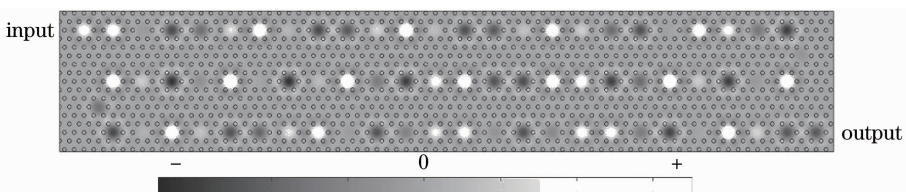


图 9 光延迟器相对模场分布

Fig. 9 Relative mode-field distribution of light in optical delayer

迟时间为 45.3 ps, 透射比仅为 15%, 相比而言, 利用 $N=3$ 的结构设计的光延迟器更有实用价值。

4 结 论

数值模拟分析了二维三角晶格光子晶体 CCW 中的慢光传播特性。结果表明, CCW 导模中心频率附近群速度比较稳定, 即 GVD 较低, 同时透射比最高, 而 $N=3$ 结构的 CCW 相对于其他结构而言, 具有较低的损耗, 较大的带宽, 同时具有相对较低的群速度。基于这种 CCW 设计了一种光延迟器结构, 其对 1513 nm 波长的光信号延迟时间为 9.4 ps, 损耗小于 1 dB。相比直线型的光延迟器, 这种延迟器不仅能充分利用空间, 减少光子晶体的浪费, 而且可以在拐角处引入其他结构, 如 Y 分支波导等, 设计更加灵活, 因此具有较广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 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**(11): 65~69
- 3 Zhang Hao, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan *et al.*. Two-dimensional magnetophotonic crystals and analysis of the mode field[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(6): 3546~3552
张 浩, 赵建林, 张晓娟 等. 二维磁性光子晶体及其模场分析 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(6): 3546~3552
- 4 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao *et al.*. Effect of the structure shape on the 8-fold photonic quasicrystals[J]. *Chinese J. 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, **37**(2): 567~571
- 5 H. Gersen, T. J. Karle, R. J. P. Engelen *et al.*. Real-space observation of ultraslow light in photonic crystal waveguides[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(7): 073903-1~4
- 6 C. Sauvan, P. Lalanne, J. P. Hugonin. Slow-wave effect and mode-profile matching in photonic crystal microcavities[J]. *Phys. Rev. B.*, 2005, **71**(16): 165118-1~4
- 7 M. Soljacic, J. D. Joannopoulos. Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals[J]. *Nat. Mater.*, 2004, **3**(4): 211~219
- 8 Y. Hamachi, S. Kubo, T. Baba. Slow light with low dispersion and nonlinear enhancement in a lattice-shifted photonic crystal waveguide[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **34**(7): 1072~1074
- 9 L. H. Frandsen, A. V. Lavrinenko, J. Fage-Pedersen *et al.*. Photonic crystal waveguides with semi-slow light and tailored dispersion properties [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9444~9450
- 10 S. Kubo, D. Mori, T. Baba. Low-group-velocity and low-dispersion slow light in photonic crystal waveguides [J]. *Opt. Lett.*, **32**(20): 2981~2983
- 11 J. Li, T. P. White, L. O'Faolain *et al.*. Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 6227~6232
- 12 Lü Shuyuan, Zhao Jianlin, Zhang Dong. Design and analysis on a wideband photonic crystal waveguide with low-group-velocity and low-dispersion[J]. *Sci. China Ser. G.*, 2010, **52**(3): 481~485
吕淑媛, 赵建林, 张 栋. 一种低群速度和低色散光子晶体波导结构及分析[J]. *中国科学 G 辑*, 2009, **39**(10): 1426~1430
- 13 S. Rawal, R. K. Sinha, M. Richard *et al.*. Slow light miniature devices with ultra-flattened dispersion in silicon-on-insulator photonic crystal [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(16): 13315~13325
- 14 Zhang Man, Pan Wei, Yan Lianshan *et al.*. Research of slow light in the two-dimensional triangular rods photonic crystal line defect waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 857~861
张 曼, 潘 炜, 闫连山 等. 二维三角晶格介质柱光子晶体线缺陷波导慢光研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 857~861
- 15 H. Altug, 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): 111102-1~111102-3
- 16 M. Svaluto Moreolo, V. Morra, G. Cincotti. Design of photonic crystal delay lines based on enhanced coupled-cavity waveguides [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**(5): 064002-1~6
- 17 Du Xiaoyu, Zheng Wanhua, Ren Gang *et al.*. Slow wave effect of 2-D photonic crystal coupled cavity array [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(1): 571~575
杜晓宇, 郑婉华, 任 刚 等. 二维光子晶体耦合腔阵列的慢波效应研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(1): 571~575
- 18 Lu Hui, Tian Huiping, Li Changhong *et al.*. Research on new type of slow light structure based in 2D photonic crystal coupled cavity waveguide [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 2049~2055
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): 2049~2055
- 19 Lü Shuyuan, Zhao Jianlin, Zhang Dong. Improved microfluidic coupled-cavity waveguides for slow light transmission[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(3): 034205-1~4
- 20 Wang Xueying, Tian Huiping, Li Changhong *et al.*. Tunable slow light by electro-optic effect in polymer photonic crystal waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1374~1378
王雪莹, 田慧平, 李长红 等. 聚合物光子晶体波导中慢光传输的电光动态调制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1374~1378
- 21 Liu Jing, Zheng Zhiqiang, Feng Zhuohong *et al.*. Tunable optical filter based on tow-dimensional heterostructure photonic crystal with neighboring dot-defects and curved waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2034~2037
刘 璟, 郑志强, 冯卓宏 等. 二维异质结光子晶体中含近邻点缺陷的弯曲波导的可调谐滤波特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2034~2037