

新型低色散光子晶体耦合腔波导慢光特性的研究

张昌莘¹ 许兴胜² 席伟¹ 李天乐¹ 陆霖¹ 王晓芳¹

(¹ 广东石油化工学院物理系, 广东 茂名 525000
² 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要 设计了一种二维三角晶格光子晶体共振耦合腔波导,应用时域有限差分法(FDTD)模拟计算 TE 偏振光的透射谱,获得波长在 $1.54538 \mu\text{m}$ 处群折射率 $n_g = 725.93$ 、群速度 $v_g = c/725.93$ 的慢光。该光子晶体共振耦合腔波导传输光的群折射率随波长变化关系呈现“U”型结构,在“U”型底部出现低色散慢光区域。计算表明“U”型底部区域波段为中心波长 $1.54720 \mu\text{m}$ 、平均群折射率 $\bar{n}_g = 142.6$ 、带宽 $\Delta\lambda = 2.16 \text{ nm}$ 、平坦率 $\sigma = 3.20\%$ 的低色散慢光。通过移动耦合腔波导第一排空气柱的位置研究低色散慢光的变化,结果表明,移动耦合腔波导第一排空气柱的位置,使得“U”型底部区域波段中心波长在 $1.54720 \sim 1.60549 \mu\text{m}$ 范围内变化,可产生平均群折射率 \bar{n}_g 由 142.6 变为 26.7 、带宽 $\Delta\lambda$ 由 2.16 nm 增大为 15.21 nm 的低色散慢光。

关键词 光通信;光子晶体耦合腔波导;时域有限差分法;低色散;慢光

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.051301

Research on the Slow Light Characteristics of a Novel Low-Dispersion Photonic-Crystal Coupled-Cavity Waveguide

Zhang Changxin¹ Xu Xingsheng² Xi Wei¹ Li Tianle¹ Lu Ji¹ Wang Xiaofang¹

(¹ Physical Department, Guangdong University of Petrochemical Technology,
Maoming, Guangdong 525000, China
² State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract We design a two-dimensional photonic crystal coupled-cavity waveguide. Transmission spectra of the waveguide are calculated by using finite-difference time-domain (FDTD) method, and slow light with an average group velocity $v_g = c/725.93$, group refractive index $n_g = 725.93$ at the central wavelength of $1.54538 \mu\text{m}$ is obtained. This coupled-cavity waveguide can produce “U” type group index-frequency curves with low-dispersion slow-light area at the bottom of the “U” type curves, and the central wavelength of the area of $1.54720 \mu\text{m}$, average group index $\bar{n}_g = 142.6$, bandwidth $\Delta\lambda = 2.16 \text{ nm}$ and flat ratio $\sigma = 3.20\%$ are obtained by calculation. We shift the location of the first row of air hole in the coupled-cavity waveguide to investigate the change of low-dispersion slow light. The results show that the central wavelength of low-dispersion slow light at the bottom of the “U” type area varies from $1.54720 \mu\text{m}$ to $1.60549 \mu\text{m}$, the average group index \bar{n}_g varies from 142.6 to 26.7 and the bandwidth $\Delta\lambda$ increases from 2.16 nm to 15.21 nm by shifting the location of the first row of air hole in the coupled-cavity waveguide.

Key words optical communications; photonic crystal coupled-cavity waveguide; finite-difference time-domain method; low dispersion; slow light

OCIS codes 130.5296; 050.5298; 230.5298; 230.7370

1 引言

1987年 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 在讨论周期性电介质结构对材料中光传播行为的影响时分别提出光子晶体。光子晶体一个重要性质就是在其周期性结构中引入缺陷,破坏其周期性,从而在光子晶体的带隙中出现局域化的缺陷模。有缺陷的光子晶体可以应用于波导、滤波器、光开关、光存储、光延迟和光调制器等光子晶体器件中,因而成为目前光子晶体研究领域的一个热门课题,受到研究者的广泛关注^[3~16]。

收稿日期: 2012-12-31; 收到修改稿日期: 2013-01-29; 网络出版日期: 2013-04-08

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(91121019)和广东省科技计划(2010B080701066)资助课题。

作者简介: 张昌莘(1956—),男,教授,主要从事光子晶体中光传输特性方面的研究。E-mail: zcx2923018@163.com

2001年 Notomi 等^[6]在三角晶格光子晶体中去掉一排空气孔,构成线缺陷波导。通过实验测得的光子晶体缺陷波导的透射光谱得到三角晶格光子晶体线缺陷波导中 $v_g = c/90$ 的低群速度光。近十年来,通过对不同光子晶体波导应用时域有限差分法(FDTD)模拟计算和不同的实验方法,从理论和实验上分别得到的最低群速度达到 $v_g = c/330$ ^[11]。

虽然光子晶体波导中群速度得到不断降低,但是由于光子晶体波导中的慢光传输存在大的色散效应而导致脉冲展宽,这使得基于光子晶体波导的慢光技术不能适用于光控器件,严重影响了光子晶体波导中慢光特性的实际应用^[12]。因此,设计低色散慢光光子晶体波导成为近几年重要的研究课题^[11,13~18]。Frandsen 等^[13]通过改变与光子晶体波导相邻的第一排及第二排柱子的半径,获得群折射率 $n_g \approx 34$ 、波长带宽 $\Delta\lambda \approx 11$ nm的低色散慢光。Li 等^[15,16]分别沿着垂直于波导方向移动与光子晶体波导相邻的第一排及第二排空气柱的位置获得一定波长范围内的低色散慢光。Ran 等^[17]沿着光子晶体波导方向改变光子晶体波导第一排空气柱的间距、Hou 等^[18]通过用啁啾光子晶体耦合波导,获得了一定波长范围内的低色散慢光。本文设计了一种新型的三角晶格共振耦合腔波导,通过优化设计共振耦合腔波导参数和移动耦合腔波导第一排空气柱的位置获得中心波长 λ_0 在 $1.54720 \sim 1.60549$ μm 范围内变化时,相应的群折射率 n_g 由 142.6 变为 26.7、带宽 $\Delta\lambda$ 由 2.16 nm 增大为 15.21 nm 的低色散慢光。

2 二维三角晶格光子晶体耦合腔波导的群折射率与色散

二维三角晶格光子晶体结构参数设计如下:背景介质折射率 $n = 3.46$ (近似为半导体硅或钢磷材料在近红外波段的折射率),晶格常数 $a = 0.328$ μm ,空气柱半径 $r = 0.275a$,在完整光子晶体的中间一排空气柱间隔去掉 3 个,形成微腔,相邻微腔之间保留 1 个空气柱,并改变中间一排剩余空气柱的半径 $R_d = 0.230a$,构成图 1(a)所示的二维三角晶格光子晶体共振耦合腔波导,其中 δx 是耦合腔波导第一排空气柱的位移。当

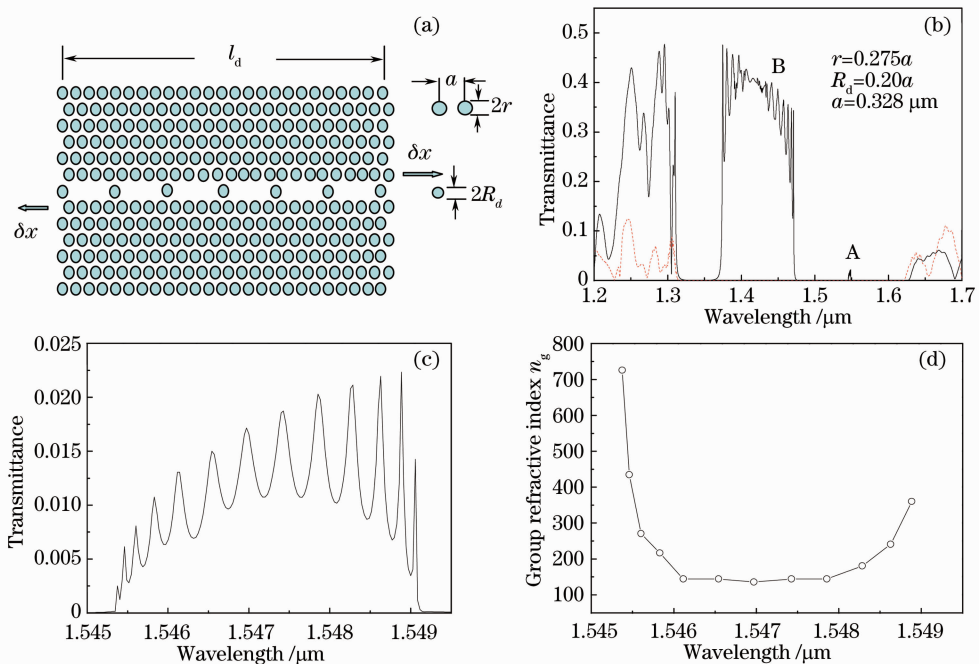


图 1 (a) 二维三角晶格光子晶体耦合腔波导;(b) TE 偏振光沿 ΓK 方向传播的光子晶体(虚线)与光子晶体波导(实线)透射谱,空气柱半径 $r = 0.275a$,中间一排剩余空气柱半径 $R_d = 0.230a$;(c) 图 1(a)中 A 区波段放大图;(d) 图 1(a)中 A 区波段群折射率和相应波长关系图

Fig. 1 (a) Schematic of two-dimensional triangular-lattice photonic crystal coupled-cavity waveguide geometry; (b) transmission spectra of photonic crystal of TE-polarized light transmitting at ΓK direction (dash) and of photonic crystal waveguide (solid), hole radius $r = 0.275a$, air hole radius of central row $R_d = 0.230a$; (c) enlarged view of wavelength area A in Fig. 1(a); (d) relation between group refractive index and wavelength of wavelength area A in Fig. 1(a)

$\delta x=0$ 时得到该光子晶体波导透射谱如图 1(b) 中实线所示。作为对比, 给出完整光子晶体的透射谱如图 1(b) 中虚线所示。由光谱图可见, 光谱范围标为 A 和 B 的波段都是光子晶体波导模。我们将研究 A 区波段的群折射率与色散。

根据图 1(a) 所示的二维三角晶格光子晶体共振耦合腔波导, 选取波导长度 $l_d=59a$, 用 FDTD 方法模拟得到该光子晶体波导 TE 偏振光沿 ΓK 方向传播的透射谱图 1(b)。图 1(c) 是波长对应 A 区波段范围内的透射谱。图 1(c) 中所示的透射谱的多峰结构来源于法布里-珀罗(FP)干涉, 利用这些干涉峰和文献[6]给出的群速度公式 $v_g = \frac{c}{n_g}$ 和群折射率公式 $n_g = \frac{\lambda^2}{2l_d\delta\lambda}$ (c 为真空光速, λ 为光的波长, l_d 为波导长度, $\delta\lambda$ 是透射谱上相邻两个干涉峰之间的间隔) 计算传输光的群折射率 n_g 和群速度 v_g 。图 1(d) 是波长对应 A 区波段的群折射率和相应波长关系曲线。

根据文献[15]定义表征传输光低色散慢光特性的物理量: 平均群折射率 $\bar{n}_g = \frac{\sum n_{ig}(\lambda_i)}{N}$ 和相应的波长带宽为 $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$; 群折射率平坦率 $\sigma = \frac{n_{g\max} - n_{g\min}}{2\bar{n}_g}$ 。取 $\sigma \leq 10\%$, 即群折射率 n_g 在 $(1 \pm 10\%) \bar{n}_g$ 范围内为低色散慢光区。为了比较不同共振耦合腔波导在不同波长范围的低色散慢光特性, 定义群折射率归一化带宽积(NDBP): $P_{\text{NDB}} = \bar{n}_g \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right) = \bar{n}_g \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right)$, 式中 $\lambda_0 = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2}$ 是低色散区的中心波长, ω_0 为与 λ_0 对应的中心频率。

由图 1(d) 所示的 n_g - λ 曲线, 计算得到共振耦合腔波导低色散慢光区中心波长 $\lambda_0 = 1.54720 \mu\text{m}$ 、带宽 $\Delta\lambda = 2.16 \text{ nm}$, 平均群折射率 $\bar{n}_g = 142.6$, 群折射率归一化带宽积 $P_{\text{NDB}} = 0.2018$, 群折射率平坦率 $\sigma = 3.20\%$ 。该光子晶体波导在波长 $1.54538 \mu\text{m}$ 处获得最大群折射率 $n_g = 725.93$ 、群速度 $v_g = c/725.93$ 的慢光。

3 移动耦合腔波导第一排空气柱后传输光的群折射率与色散

为了使光子晶体共振耦合腔波导能在实际中应用, 需要增大带宽并有较低的群折射率, 在图 1(a) 所示的共振耦合腔波导中将第一排空气柱沿着波导相反的两个方向移动 δx 可以得到带宽较宽、群折射率较低的慢光。图 2 是移动耦合腔波导第一排空气柱位移 $\delta x = 0.06a$ 时在图 1(b) 中 A 区波段的透射谱和群折射率。

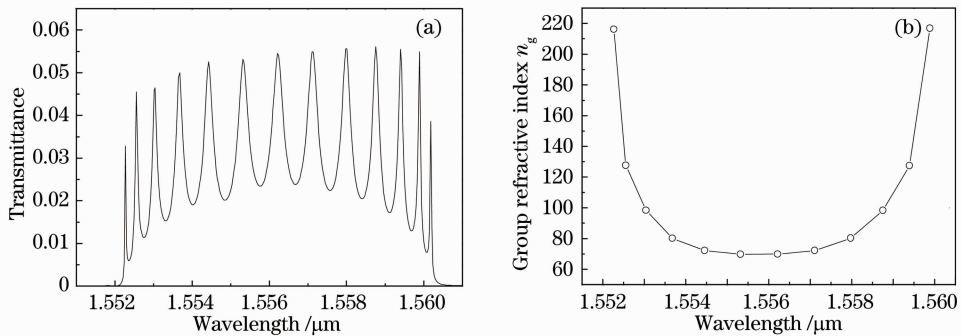


图 2 (a) 移动耦合腔波导第一排空气柱 $\delta x = 0.06a$ 时, 在图 1(b) 中 A 区波段的透射谱;

(b) 图 2(a) 中波段的群折射率和相应波长关系图

Fig. 2 (a) Transmission spectra of wavelength area A in Fig. 1(b) by shifting the first row of air hole by $\delta x = 0.06a$ in the coupled-cavity waveguide; (b) relation between group index and wavelength of wavelength area A in Fig. 2(a)

由图 2 可以看出在 A 区波段群折射率随波长变化呈现“U”型结构。在“U”型底部平坦区域构成低色散区。图 3 是移动耦合腔波导第一排空气柱的位移 δx 从 $0.01a$ 变化至 $0.20a$ 时在图 1(b) 中 A 区波段的群折射率和相应波长关系图。

表 1 给出与图 3 对应的共振耦合腔波导在 A 区波段的平均群折射率 \bar{n}_g 、带宽 $\Delta\lambda$ 、群折射率归一化带宽积、群折射率平坦率 σ 和平均透射比 \bar{T} 等值。

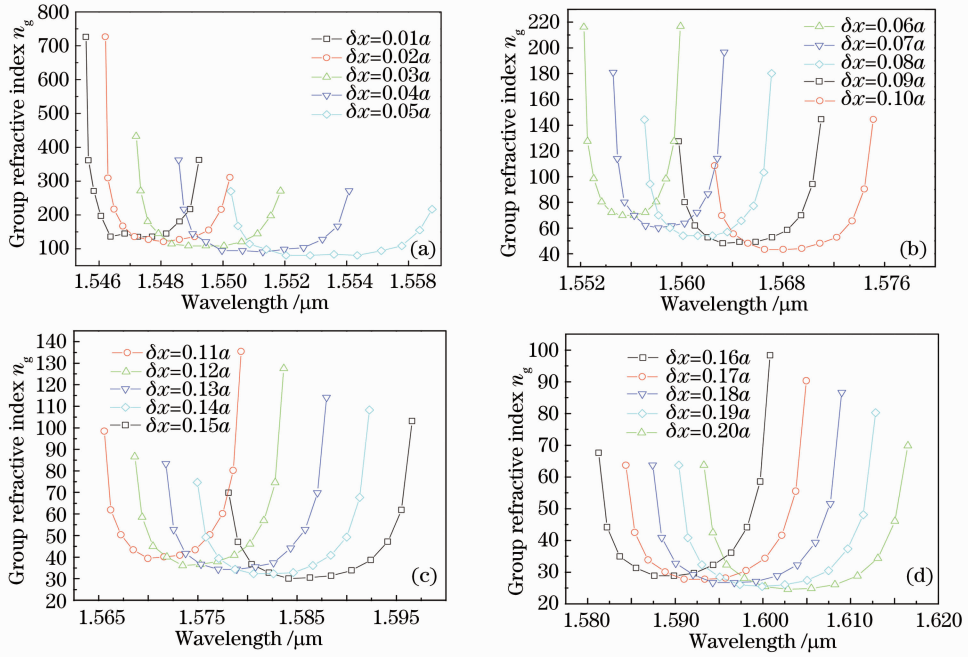


图3 移动耦合腔波导第一排空气柱的位移 δx 从 $0.01a$ 变化至 $0.20a$ 时在图 1(b) 中 A 区波段的群折射率和相应波长关系图

Fig. 3 Relation between group refractive index and wavelength of wavelength area A in Fig. 1(b) when δx varies from $0.01a$ to $0.20a$

表 1 移动耦合腔波导第一排空气柱的位移 δx 从 $0.01a$ 变化至 $0.20a$ 时的耦合腔波导在图 1(b) 中 A 区波段的平均群折射率 \bar{n}_g 、带宽 $\Delta\lambda$ 、群折射率归一化带宽积、群折射率平坦率 σ 和平均透射比 \bar{T}

Table 1 Average group index \bar{n}_g , peak interval $\Delta\lambda$, NDBP, flat ratio σ of group refractive index and average transmittance \bar{T} of the wavelength area A in Fig. 1(b) when δx varies from $0.01a$ to $0.20a$

| $\delta x/a$ | Central wavelength $\lambda_0/\mu\text{m}$ | \bar{n}_g | $\Delta\lambda/\text{nm}$ | NDBP | $\sigma/\%$ | Average transmittance $\bar{T}/\%$ |
|--------------|--|-------------|---------------------------|--------|-------------|------------------------------------|
| 0.00 | 1.54720 | 142.6 | 2.16 | 0.1956 | 3.20 | 1.69 |
| 0.01 | 1.54749 | 140.0 | 2.23 | 0.2018 | 3.34 | 1.90 |
| 0.02 | 1.54834 | 128.0 | 2.40 | 0.1985 | 5.93 | 2.22 |
| 0.03 | 1.54973 | 117.3 | 2.78 | 0.2050 | 5.34 | 2.77 |
| 0.04 | 1.55159 | 96.7 | 3.25 | 0.2025 | 6.66 | 3.52 |
| 0.05 | 1.55391 | 87.2 | 3.74 | 0.2097 | 7.99 | 4.43 |
| 0.06 | 1.55622 | 75.1 | 5.08 | 0.2450 | 6.97 | 5.36 |
| 0.07 | 1.55915 | 66.2 | 5.83 | 0.2475 | 9.12 | 6.51 |
| 0.08 | 1.56235 | 59.9 | 6.60 | 0.2531 | 9.64 | 7.63 |
| 0.09 | 1.56572 | 53.3 | 7.36 | 0.2506 | 9.75 | 8.75 |
| 0.10 | 1.56932 | 48.1 | 8.22 | 0.2518 | 9.90 | 9.69 |
| 0.11 | 1.57235 | 41.4 | 7.72 | 0.2030 | 4.76 | 10.67 |
| 0.12 | 1.57606 | 38.5 | 8.38 | 0.2045 | 6.18 | 11.55 |
| 0.13 | 1.57905 | 38.0 | 10.58 | 0.2546 | 9.58 | 12.42 |
| 0.14 | 1.58275 | 35.8 | 11.29 | 0.2556 | 9.83 | 13.21 |
| 0.15 | 1.58642 | 33.4 | 12.03 | 0.2532 | 9.96 | 13.89 |
| 0.16 | 1.59003 | 31.9 | 12.69 | 0.2545 | 9.53 | 14.50 |
| 0.17 | 1.59358 | 30.8 | 13.32 | 0.2573 | 9.88 | 15.05 |
| 0.18 | 1.59902 | 29.5 | 13.96 | 0.2576 | 9.46 | 15.91 |
| 0.19 | 1.60237 | 28.0 | 14.60 | 0.2549 | 8.99 | 16.67 |
| 0.20 | 1.60550 | 26.7 | 15.21 | 0.2531 | 8.00 | 17.65 |

4 讨论

从图3可以看出,沿着耦合腔波导方向按照步长为 $0.01a$ 移动第一排空气柱位置得到的每一个耦合腔波导在图1(a)A区波段的群折射率和相应波长的关系呈现“U”型结构。随着位移值 δx 的增大,平均群折射率 \bar{n}_g 减小,“U”型底部平坦区域将增宽,同时平均透射率 \bar{T} 也随之增大。最大群折射率在“U”型结构两边具有对称性分布。随着移动的 δx 值增大,最大群折射率对应的波长出现红移。从表1中的数据可知,当沿着耦合腔波导方向移动第一排空气柱位置的 δx 值从0开始递增至 $0.20a$ 时,中心波长从 $1.54720\ \mu\text{m}$ 移动至 $1.60549\ \mu\text{m}$,平均群折射率 \bar{n}_g 由142.6逐渐减小26.7,带宽 $\Delta\lambda$ 从2.16 nm逐渐增大到15.21 nm。从表1或图3中可以得到:若沿着耦合腔波导方向移动第一排空气柱的位移为 $0.06a \leq \delta x \leq 0.20a$,则平均群折射率为 $75.1 \geq \bar{n}_g \geq 26.7$,NDBP值约为0.25,带宽 $\Delta\lambda$ 在5.08~15.21 nm之间,平均透射率为 $5.36\% \leq \bar{T} \leq 17.65\%$ 。

5 结论

根据二维三角晶格光子晶体线缺陷波导中光子晶体长腔结构共振耦合原理,设计了一种二维三角晶格由3孔腔构成的光子晶体共振耦合腔波导。应用FDTD法计算了该共振耦合腔波导的群折射率 n_g ,显示了群折射率和相应波长的关系具有“U”型结构;沿着耦合腔波导方向移动第一排空气柱位置,可增大“U”型底部的宽度,即增大带宽 $\Delta\lambda$ 。利用所设计的二维三角晶格光子晶体共振耦合腔波导,通过改变耦合腔波导第一排空气柱的位移 δx 可获得中心波长在 $1.54720 \sim 1.60549\ \mu\text{m}$ 范围内,群折射率 \bar{n}_g 为 $26.7 \sim 142.6$ 、带宽 $\Delta\lambda$ 为 $2.16 \sim 15.21\ \text{nm}$ 的低色散慢光,尤其是群折射率 \bar{n}_g 在 $26.7 \sim 75.1$ 范围内带宽 $\Delta\lambda$ 达到 $5.08 \sim 15.21\ \text{nm}$ 、NDBP值约为0.25的低色散慢光。这种光子晶体共振耦合腔波导为光存储、光延迟和光调制器等器件方面的应用提供了理论依据。

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 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 W. B. Robert, J. G. Daniel, L. Alexander. Applications of slow light in telecommunications[J]. *Opt. Photon. News*, 2006, **17**(4): 19~23
- 4 H. Altug, J. Vučković. Photonic crystal nanocavity array laser[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(22): 8819~8828
- 5 Fu Haiwei, Zhao Hui, Qiao Xueguang *et al.*. Study on temperature response of photonic crystal microcavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 237~240
傅海威, 赵辉, 乔学光等. 光子晶体微腔温度响应特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 237~240
- 6 M. Notomi, K. Yamada, A. Shinya *et al.*. Extremely large group-velocity dispersion of line-defect waveguides[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(25): 253902
- 7 Qu Lianjie, Yang Yuede, Huang Yongzhen. Slow light characteristics of photonic crystal waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 013002
曲连杰, 杨跃德, 黄永箴. 光子晶体波导慢光特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 013002
- 8 Tan Yi, Yuan Zongheng. Transmission characteristic of 2D regular triangular lattice metallic photonic crystal in THz range[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(7): 071601
谭毅, 袁纵横. 太赫兹波在二维正三角晶格金属光子晶体中的传输特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(7): 071601
- 9 Feng Yaping, Zhou Jun, Yang Mingyang *et al.*. Fabrication and optical properties of two-dimensional Thue-Morse quasicrystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0423001
冯亚萍, 周骏, 阳明仰等. 二维Thue-Morse型准周期光子晶体的制作与光学特性[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0423001
- 10 Wu Xiaoyang, Liang Pei, Dong Qianmin *et al.*. Design and optimization of two-dimensional photonic crystal four-wavelength wavelength division multiplexing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(12): 122302
吴晓阳, 梁培, 董前民等. 二维光子晶体四波长波分复用器的设计和优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(12): 122302
- 11 J. Jágerská, N. L. Thomas, V. Zabelin *et al.*. Experimental observation of slow mode dispersion in photonic crystal coupled-cavity waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(3): 359~361

- 12 A. Imhof, L. V. Willem, R. Sprik *et al.*. Large dispersive effects near the band edges of photonic crystals[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(15): 2942~2945
- 13 L. H. Frandsen, A. V. Lavrinenko, J. F. Pedersen *et al.*. Photonic crystal waveguides with semi-slow light and tailored dispersion properties[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(20): 9444~9450
- 14 A. Saynatjoki, M. Mulet, J. Ahoelto *et al.*. Dispersion engineering of photonic crystal waveguides with ring-shaped[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8323~8328
- 15 L. Juntao, P. W. Thomas, Liam O' Faolain *et al.*. Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 6227~6232
- 16 F. C. Leng, W. Y. Liang, B. Liu *et al.*. Wideband slow light and dispersion control in oblique lattice photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 5709~5712
- 17 Hao Ran, E. Cassan, H. Kurt *et al.*. Novel slow light waveguide with controllable delay-bandwidth product and ultra-low dispersion[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 5942~5950
- 18 J. Hou, H. M. Wu, D. S. Citrin *et al.*. Wideband slow light in chirped slot photonic crystal coupled waveguides[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(10): 10567~10580