

基于方形孔线缺陷的新型光子晶体零色散慢光结构研究

张伟 王智勇 王文超 杨辉 刘永

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 为了获得最优化的光子晶体零色散慢光结构,在传统的光子晶体线缺陷波导结构的基础上,进一步在线缺陷上下两侧各引入了两排方形空气孔,并进一步优化了这两排方形孔的结构参数。通过平面波展开法(PWE)与时域有限差分法(FDTD)进行数值分析表明,这种新型结构的光子晶体波导能够在中心波长 1550 nm 处实现带宽为 8.34 nm、平均群折射率为 61、群速度色散(GVD)为 10^4 量级的理想宽带慢光。

关键词 光子晶体;线缺陷;零色散;慢光

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1006006

Investigation on a Novel Photonic Crystal Structure with Dispersion-Free Slow Light Based on Line-Defect of Quadrate Air Holes

Zhang Wei Wang Zhiyong Wang Wenchao Yang Hui Liu Yong

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract To obtain the optimized structure of photonic crystals with dispersion-free slow light, based on the traditional line-defect structure of photonic crystal waveguides, we introduce a novel type of slow light photonic crystal waveguide with a line defect which is surrounded by four rows of quadrate air holes, and optimize the structural parameters of the two rows of quadrate air holes. By means of the plane wave expansion (PWE) and 2D finite difference time domain (FDTD), our numerical analysis shows that, at the center wavelength of 1550 nm, our new design can present a wideband dispersion-free slow light, which in possession of a wavelength bandwidth of 8.34 nm, an average group index of 61 and a group velocity dispersion (GVD) of 10^4 .

Key words photonic crystals; line defect; dispersion-free; slow light

OCIS codes 160.5298; 130.5296; 130.3120

1 引言

近年来随着多媒体技术在互联网中日益增长的应用,人们对带宽的需求也越来越大,而传统的光-电-光中继传输方式由于受到量子效应和电子之间相互作用的限制,无法在带宽方面得到进一步的提高,因而全光通信必然是下一代网络的发展方向,而慢光技术^[1~4]是实现全光通信的关键技术,慢光即让光脉冲的传播速度减小到远小于真空中传播的速

度。光子晶体由于体积小,能耗低,方便集成,使其在实现慢光方面存在得天独厚的优势^[1,5,6],更被誉为“光半导体”,为人们实现对光子的控制指明了方向,而且由于光子晶体慢光是基于结构色散而非材料色散,因此可以在常温下实现慢光,并且通过选择合理的晶格常数就可以获得相应波长的慢光,为慢光器件的设计提供了极大的方便。另一方面,在强电磁场作用下,很多介质都会产生非线性效应,对这

收稿日期: 2011-05-09; **收到修改稿日期**: 2011-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(60925019, 61090393)和中央高校新兴学科与创新研究基金(ZYGX2010X013)资助课题。

作者简介: 张伟(1985—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: zhangweidkd@163.com

导师简介: 王智勇(1969—),男,博士,副教授,主要从事量子光学与光子晶体等方面的研究。

E-mail: zywang@uestc.edu.cn

些效应的研究有着重要意义,而慢光可以增强光与物质的相互作用^[4],起到增强非线性相互作用的效果,这使得其在非线性光学研究中有着重要意义^[7],又由于在光子晶体器件中可以方便地掺入各种非线性物质,所以采用光子晶体实现慢光,同时在其中加入非线性物质增强物质与光的相互作用是一个很好的选择。

目前基于光子晶体的慢光技术主要有两类^[8],一类是零色散型慢光,即在完整晶格中引入一线缺陷,并通过优化线缺陷周围空气孔径的结构参数,进而在完整晶格的带隙^[9]范围内获得直而平坦的能带结构,直而平坦的能带结构表明在这一频段范围内存在宽带慢光。另一类是色散补偿型慢光,即在完整晶格中引入两线缺陷构成互补性耦合波导,进而在完整晶格的带隙范围内获得理想的座椅状能带,再通过选择合理的啁啾参数来实现对不同频率光的色散补偿,便可以得到理想的宽带慢光。

由于色散补偿型慢光器件需要引入啁啾参数,结构较复杂,对工艺要求较高,所以本文提出了一种实现宽带慢光的零色散慢光解决方案,该方案在传统圆孔三角晶格光子晶体线缺陷的上下两侧,各用两排方形孔替换原有的圆形孔,这样引入的方形孔破坏了原来圆孔三角格子的对称性,可以减小传输损耗^[2],通过调节这两排方形孔的大小来优化缺陷模式的色散特性。通过选择合理的结构参数,可以得到理想的宽带零色散慢光。

2 结构设计与参数优化

本文研究的光子晶体方形孔线缺陷器件为 W1 型波导,其结构如图 1(a)所示,该结构将传统的圆孔三角晶格光子晶体慢光结构^[10]中靠近线缺陷的第 1 排与第 2 排圆孔改为了方形孔,其中 Δ 为晶格常数, r 为背景圆孔的半径, W 为缺陷波导宽度, $2A$ 为第 1 排方形孔的边长, $2B$ 为第 2 排方形孔的边长。并通过第 1 排方形孔边长($2A$)与第 2 排方形孔边长($2B$)的调节来优化器件的色散特性。采用的背景介质为 Si($n_a=3.5$),孔的材料为空气($n_b=1$),其中完整圆孔三角晶格光子晶体的禁带宽度如图 1(b)所示为 $(0.20521 \sim 0.27242)(2\pi c/\Delta)$,各结构参数之间的关系如下: $r=0.3\Delta$, $W=1.732\Delta$ 。

采用二维平面波展开(PWE)^[11]方法,在分辨率取 32 时,可以得到完整圆孔三角晶格光子晶体的禁带结构以及方形线缺陷波导偶模的色散关系 $\omega(\mathbf{k})$,并由该色散关系与表达式^[1]

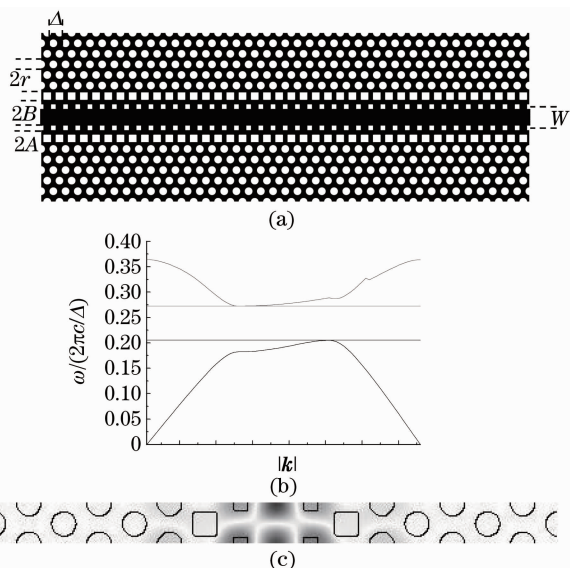


图 1 (a)二维光子晶体方形空气孔线缺陷波导的结构; (b)完整圆形空气孔三角晶格的带隙结构; (c)波导的静态场分布

Fig. 1 (a) Structure of the designed two-dimensional photonic waveguide; (b) band gap of the perfect triangular lattice; (c) static field distribution of the waveguide

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

$$n_g = \frac{cd\mathbf{k}}{d\omega} = n + \frac{\omega dn}{d\omega}, \quad (2)$$

就可以计算得到偶模的群速度 v_g 与群折射率 n_g 。式中 ω 为光的角频率, \mathbf{k} 为沿波导方向的波矢, c 为真空中的光速, n 代表光子晶体的等效折射率。

为了获得更好的慢光模式,增加带宽,降低群速,进一步分析了该波导的各结构参数对器件色散特性的影响。

如图 2(a)所示,当最靠近缺陷波导边沿的第 1 排方形孔的边长 $2A$ 分别取: $0.30\Delta, 0.32\Delta, 0.34\Delta, 0.36\Delta, 0.38\Delta, 0.40\Delta$ 时,随着方孔边长的减小,方形孔面积减小时,波导等效折射率增加,能带自然下移变得陡峭,同时图 2(b)所示的 $n_g-\omega$ 曲线平坦区域加大,即慢光带宽增加,设定 $2B$ 为 0.6Δ 。如图 3(a)所示,当靠近缺陷波导边沿的第 2 排方形孔分别取: $0.56\Delta, 0.59\Delta, 0.61\Delta, 0.63\Delta, 0.66\Delta$ 时,随着方孔边长的增加,方形孔面积增加,波导等效折射率下降,能带自然上移,同时图 3(b)中的 $n_g-\omega$ 曲线随之上移,即慢光群折射率 n_g 增加,这里设定 $2A$ 为 0.34Δ 。结合图 1(c)中的静态场分布图,知慢光模式场主要分布于第 1 排孔与第 2 排孔,同时更多地分布于第 1 排孔中,整体能带都对第 1 排孔的结构参

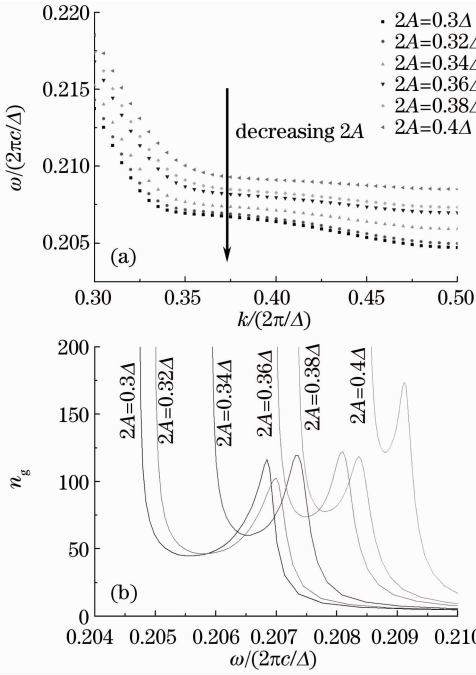


图2 偶模色散特性曲线(a)以及群折射率曲线(b)随第一排方形孔边长 $2A$ 变化关系,这里设定 $2B=0.6\Delta$

Fig. 2 (a) Calculated dispersion curves for the even mode and (b) group index of the waveguide corresponding to different value of $2A$, where $2B=0.6\Delta$ are assumed

数很敏感,因此调节第1排孔的结构参数时,能带会发生整体的移动。而对于第2排孔,主要是布里渊边界处的光对其敏感,能带随其增加而向上摆动。因此可以通过调节第1排孔边长 $2A$ 粗调能带结构,并通过调节第2排孔边长 $2B$ 细调能带结构,合理地优化这两个结构参数就可以得到理想的宽带零色散慢光,经过进一步的优化得到的最优结构参数为: $2A=0.3454\Delta$, $2B=0.59\Delta$ 。

3 数值分析与时域有限差分法仿真

3.1 群速度色散与带宽分析

图4(a)为采用PWE方法计算得到的方形孔线缺陷波导偶模的色散曲线(实线)以及 n_g-k 曲线(虚线),计算结果表明:由于该缺陷的引入,在完整晶格禁带范围内出现了一条相当平坦的能带,结合 n_g-k 曲线说明在该波导中存在宽带的慢光。由得到的色散关系与表达式

$$\beta_2 = \frac{d^2 k}{d\omega^2} = -\frac{d^2 \omega}{dk^2} \left/ \left(\frac{d\omega}{dk} \right)^3 \right. = -\left(\frac{1}{v_g} \right)^3 \frac{d^2 \omega}{dk^2} = -\left(\frac{1}{v_g} \right)^3 \frac{dv_g}{dk}, \quad (3)$$

可以得到群速度色散(GVD)参数 β_2 ,如图4(b)所

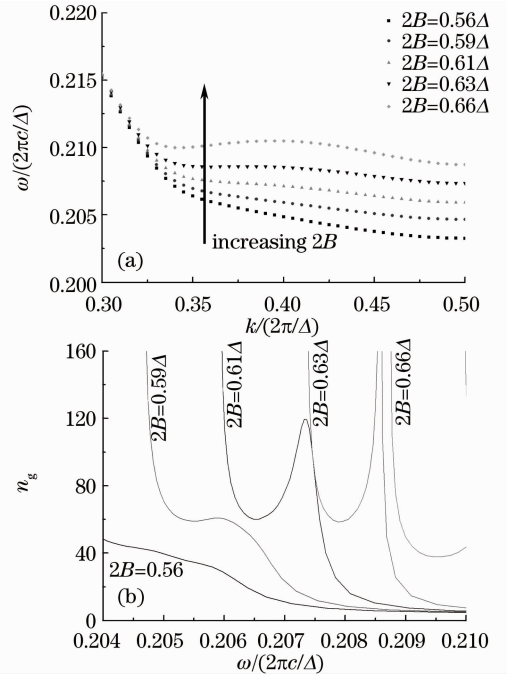


图3 偶模色散特性曲线(a)以及群折射率曲线(b)随第二排方形孔边长 $2B$ 变化关系,这里设定 $2A=0.34\Delta$

Fig. 3 (a) Calculated dispersion curves for the even mode and (b) group index of the waveguide corresponding to different value of $2B$, where $2A=0.34\Delta$ are assumed

示,波矢 k 的值在 $(0.380 \sim 0.448)(2\pi/\Delta)$ 范围内, β_2 处于 10^4 量级,这表明在这一范围内色散很小,存在理想的慢光。

进一步由图4(c)中的 $n_g-\omega$ 曲线分析该慢光器件的带宽性能,该曲线表明在角频率为 $(0.20565 \sim 0.20676)(2\pi c/\Delta)$ 范围内存在理想的慢光,这时 $n_g = 60 \pm 6$ 。平均群折射率 \bar{n}_g 定义为

$$\bar{n}_g = \frac{\int_{\omega_0 - \Delta\omega/2}^{\omega_0 + \Delta\omega/2} n_g(\omega) d\omega}{\Delta\omega}, \quad (4)$$

其中 $\Delta\omega$ 为角频率带宽,经过计算得到平均群折射率为61。

3.2 仿真

对这一零色散型慢光结构采用了时域有限差分法(FDTD)^[12]进行了验证,仿真结构如图5(a)所示,仿真时采用了耦合波导将光耦合进入光子晶体波导,由于耦合时存在损耗,所以在两个探测器接受到的光通量存在差异,其中耦合波导长度 $l=5\Delta$,宽度为 5.196Δ ,光子晶体波导器件长度 $2N_x=80\Delta$,采用中心角频率为 $0.20621(2\pi c/\Delta)$,角频率带宽为 $1.11 \times 10^{-3}(2\pi c/\Delta)$ 的高斯光源作为验证光源,其坐标为 0.5Δ ,并设置了完美匹配层(PML)边界条

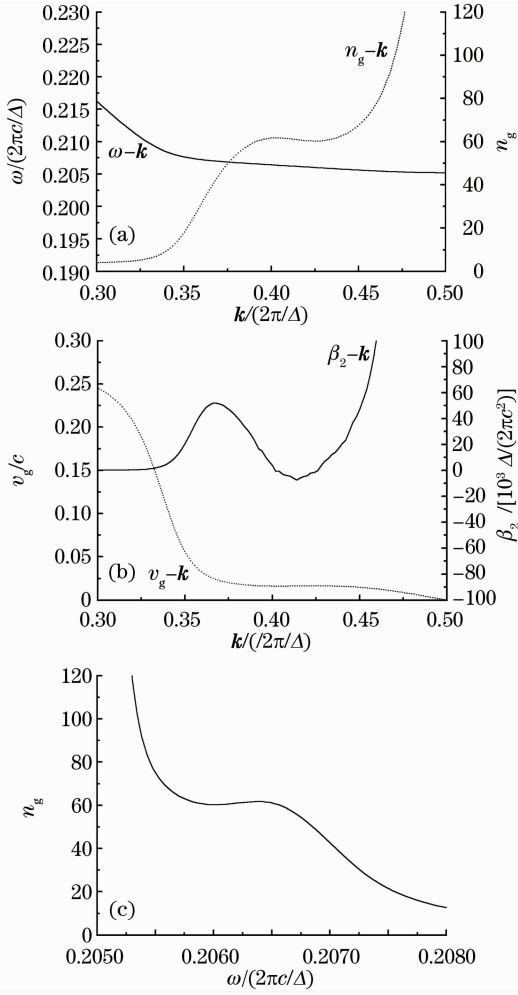


图 4 (a) 方形孔线缺陷光子晶体波导的色散曲线图, 其结构参数 $2A=0.3454\Delta$, $2B=0.59\Delta$; (b) 群速度和群速度色散曲线; (c) 群折射率曲线

Fig. 4 Dispersion curve of the waveguide of Fig. 1 (a) with $2A=0.3454\Delta$, $2B=0.59\Delta$; (b) corresponding group velocity and GVD curves; (c) corresponding group indices curve

件, 分辨率取为 32。这里共设置了两个光通量探测点(C、D), 其中 C 的坐标为 5Δ , D 的坐标为 85Δ , 从图 5(b) 可以看出 C 探测点的半峰全宽(FWHM)为 1500 个时间单位, D 探测点的 FWHM 为 1557 个时间单位, 脉冲形变仅为 3.8%, 另一方面 C 探测点的高斯脉冲波峰与 D 探测点高斯脉冲波峰存在 5430 个时间单位的延迟, 由表达式

$$\tau = \frac{L}{v_g} = \frac{Ln_g}{c}, \quad (5)$$

计算可知平均群折射率大约为 67.8, 这和理论计算结果之间存在一些误差, 其原因在于 PWE 算法与 FDTD 算法之间的误差, 验证结果表明在此结构中确实存在宽带的零色散慢光: 式中 τ 为光脉冲经过

波导后的延迟, L 为波导的长度。

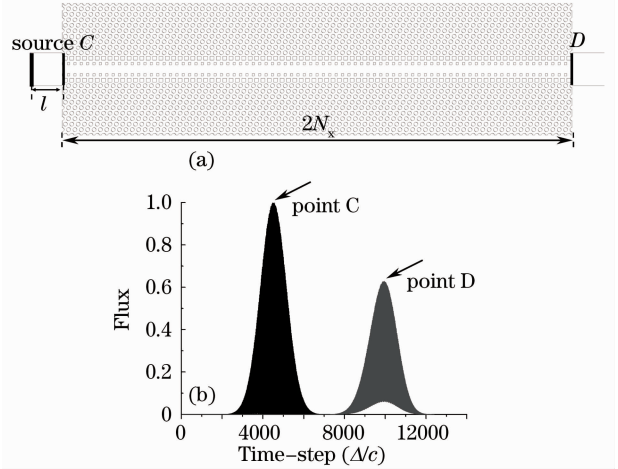


图 5 (a) FDTD 仿真结构示意图, 含耦合波导; (b) C、D 两点探测器接收到的光脉冲波形图, 高斯光源的中心频率为 $0.20621(2\pi c/\Delta)$

Fig. 5 (a) Schematic diagram of the device, with coupling straight waveguide; (b) pulse shapes detected by monitor C and D

4 结 论

设计了基于光子晶体的新型零色散慢光结构, 并通过进一步优化结构参数, 最终得到了平均群折射率为 61, 带宽为 8.34 nm, 群速度色散在 10^4 量级的理想慢光, 这对未来的全光信息技术具有参考价值。

参 考 文 献

- 1 T. F. Krauss. Slow light in photonic crystal waveguides[J]. *J. Phys. D.*, 2007, **40**(9): 2666~2670
- 2 Zhang Man, Pan Wei, Yan Lianshan *et al.*. Research of slow light in the two-dimensional triangular rods photonic crystal line defected 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
- 3 T. F. Krauss. Why do we need slow light[J]. *Nat. Photon.*, 2008, **2**(8): 448~450
- 4 T. Baba. Slow light in photonic crystals[J]. *Nat. Photon.*, 2008, **2**(8): 465~473
- 5 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 6 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 7 Qu Lianjie, Yang Yuede, Huang Yongzhen. Slow-light characteristics of photonic crystal waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0113002
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): 0113002
- 8 J. Hou, H. Wu, D. S. Citrin *et al.*. Wideband slow light in

- chirped slot photonic-crystal coupled waveguides [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(10): 10567~10580
- 9 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
- 10 H. F. Lars, V. L. Andrei, F. P. Jacob *et al.*. Photonic crystal waveguides with semi-slow light and tailored dispersion properties [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9444~9449
- 11 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): 173~190
- 12 A. Farjadpour, D. Roundy, A. Rodriguez *et al.*. Improving accuracy by subpixel smoothing in the finite-difference time domain[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(20): 2972~2974