

# 基于光子晶体耦合波导的宽带慢光研究

张 伟 王智勇 王文超 杨 辉 邱 琪

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要** 提出了在完整三角晶格光子晶体中引入两线缺陷构成的耦合型波导结构。通过分析谱带形对不同结构参数的依赖关系,在最优化的光子晶体耦合波导中,找到了一种独特的、群速近似为零的谱带。通过对波导宽度的啁啾实现了不同频率光的色散补偿,最终得到了带宽为 13.24 nm、平均群折射率为 28 的宽带理想慢光,并进一步采用二维时域有限差分(FDTD)算法进行了验证。数值分析结果表明,高斯脉冲在耦合波导中传输后的相对时域展宽低于 10%。

**关键词** 集成光学;光子晶体;耦合波导;色散补偿;慢光

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0213001

## Investigation on Wideband Slow Light Based on Photonic-Crystal Coupled Waveguides

Zhang Wei Wang Zhiyong Wang Wenchao Yang Hui Qiu Qi

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

**Abstract** A photonic-crystal coupled waveguide is proposed by introducing two line-defects to perfect triangular lattice. By analyzing the dependence of band shape on various structure parameteral, unique band with approximate zero group velocity can be obtained in an optimized photonic-crystal coupled waveguide. Moreover, by chirping the widths of the photonic-crystal waveguides in the optimized structure, a perfect wideband slow light is obtained, it possesses the bandwidth of 13.24 nm and the average group index of 28, which is verified by means of two-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) simulations, and our numerical analysis shows that Gaussian pulses passing through the coupled waveguide have a relative temporal spreading below 10%.

**Key words** integrated optics; photonic crystal; coupled waveguide; dispersion compensation; slow light

**OCIS codes** 130.5296; 130.3120

## 1 引 言

随着全光信息技术的发展,光缓存器件、光传感器和可调谐式光延迟线等光信息处理器件的需求日益增长,而实现这些器件功能的关键技术是慢光技术<sup>[1~5]</sup>。目前实现慢光最实用方法的是利用光子晶体波导,它可以实现常温条件下的理想宽带慢光,光子晶体器件具有体积小,材料单一,结构简单的特点,可以很好地与其他功能器件进行集成,构成集成光学器件,这对构建小型化全光信息处理系统具有

很大的意义。而且光子晶体慢光技术是基于结构色散的,可以根据需要选择匹配的晶格常数实现相应波长的慢光,提高了慢光器件设计的便利性。

近年来兴起了光与物质相互作用的研究热潮,而如何增强光与物质的相互作用始终困扰着科学家们。光子晶体慢光器件的出现很好地解决了这一难题。在光子晶体慢光器件中,光脉冲群速度减得很慢,脉冲被局限在很小的空间范围内,如果在光子晶体慢光器件中引入非线性物质就可以极大地加强光

**收稿日期**: 2011-07-18; **收到修改稿日期**: 2011-08-17

**基金项目**: 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

与物质之间的非线性作用。

目前基于光子晶体的慢光技术主要有两类<sup>[6]</sup>: 1)在完整晶格中引入一线缺陷,并通过优化线缺陷的结构参数进而得到直而平坦的能带结构,便可以获得理想的零色散慢光<sup>[7~9]</sup>; 2)在完整晶格中引入两线缺陷构成互补性耦合波导<sup>[10]</sup>,并通过优化结构参数得到理想的座椅状能带,再选择合理的啁啾参数来实现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可以得到更大的带宽,所以本文提出了新型的色散补偿慢光结构,并结合等效折射率理论与平面波展开(PWE)法<sup>[11]</sup>对器件色散特性进行了分析,优化了结构参数,得到了理想的座椅状能带,并选择合理的啁啾参数实现了对不同频率光的色散补偿,接着采用时域有限差分(FDTD)法<sup>[12]</sup>进行了验证,证明了该结构可以实现带宽为 13.24 nm,平均群折射率为 28 的理想慢光。

## 2 光子晶体耦合波导的结构优化考虑

本文所考虑的光子晶体耦合波导慢光结构如图 1 所示,在以硅材料( $\epsilon = 12$ )为背景介质包含了空气圆孔晶格常数为  $a$  的三角晶格中,引入了两线缺陷构成互补型耦合波导,并通过调节器件的结构参数:中间三排空气孔中靠近波导的两排孔的水平偏移量( $ds$ )与最中间空气孔的半径( $r'$ )获得了理想的座椅状能带,进一步选择合理的啁啾参数,通过对结构参数的啁啾实现不同频率光的色散补偿,便可以得到理想的宽带慢光了,该波导是上下对称的,背景空气孔的半径  $r = 0.3a$ 。

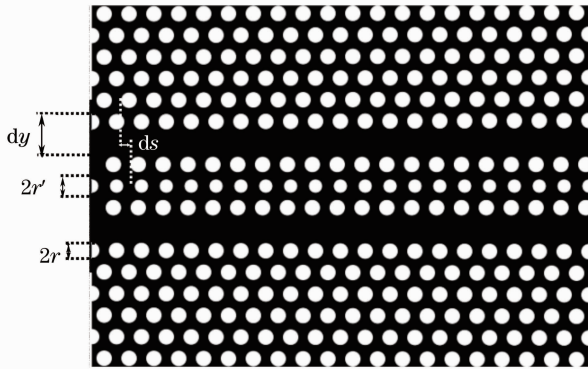


图 1 光子晶体耦合波导器件结构图

Fig. 1 Structure of the photonic crystal coupled waveguide

由于实际的光子晶体慢光波导为三维的绝缘衬底硅(SOI)结构,而三维的PWE法计算量太大,普通的计算机难以承担,因此必须采用等效理论进行折射率等效,将三维波导结构等效为二维结构,然后利用二维的PWE方法进行数值计算。经过折射率等效后,得到等效折射率<sup>[13]</sup>  $n = 2.90$ ,其计算误差小于 3%。又由于该结构是从三维结构等效为二维结构的,要求所用频段的光必须处于空气光锥(图 2 中的 light line)外侧,这样才能保证光脉冲在光子晶体波导中低损耗的传输。

对于色散补偿型慢光器件,需要通过调节光子晶体器件的结构参数来获得理想的座椅状能带,因此这里研究了各结构参数对器件色散特性的影响。图 2 所示的是结构参数  $ds, r'$  与色散特性曲线的关系以及慢光模式传输的场图,在这里  $dy$ (波导宽度)取值为  $1.732a$ 。需要注意的是这里的研究的是电场分量为  $E_y$  的偶模。

如图 2(a)所示,中间三排空气孔中靠近波导的两排孔的水平平移  $ds$  分别取  $0.0a, 0.1a, 0.2a, 0.3a, 0.4a, 0.5a$  时,随着  $ds$  的增加,能带逐渐上移,渐渐发生弯曲,在  $ds = 0.4a$  时色散曲线表现出 S 形态,和要得到的座椅状能带比较接近,因此可以在  $0.3a \sim 0.4a$  之间进一步优化结构参数。如图 2(b)所示,最中间空气孔的半径  $r'$  分别取  $0.2a, 0.22a, 0.24a, 0.26a, 0.28a, 0.3a$  时,随着空气孔半径的增加,空气孔面积增加,波导等效折射率下降,能带自然上移,而且孔径半径增加时,主要是布里渊边界处的能带上移变得平坦。另一方面结合图 2(c)中的静态场分布图,知道模式场主要分布于中间三排孔与沟道波导中,中间三排孔的结构参数对色散特性的影响很大,因此通过对中间三排空气孔结构参数的优化便可以得到理想的座椅状能带。这时能带位于空气光锥外侧的,这是很重要的,实际的光子晶体慢光器件为三维的 SOI 结构,只有位于空气光锥外侧的光才能在光子晶体波导中低损耗的传输。图 2 所示的结构参数与色散特性的关系曲线进一步表明,色散特性曲线对  $ds$  的变化比较敏感,能带随  $ds$  的改变变化明显,而对  $r'$  相对不敏感,色散特性曲线随之变化幅度较小,主要是布里渊边界处的能带随之增加而上移,因此可以通过  $ds$  粗调能带结构, $r'$  细调能带结构进而得到理想的座椅状能带,经过进一步的参数优化最终得到的结构参数为  $ds = 0.372a, r' = 0.256a$ 。

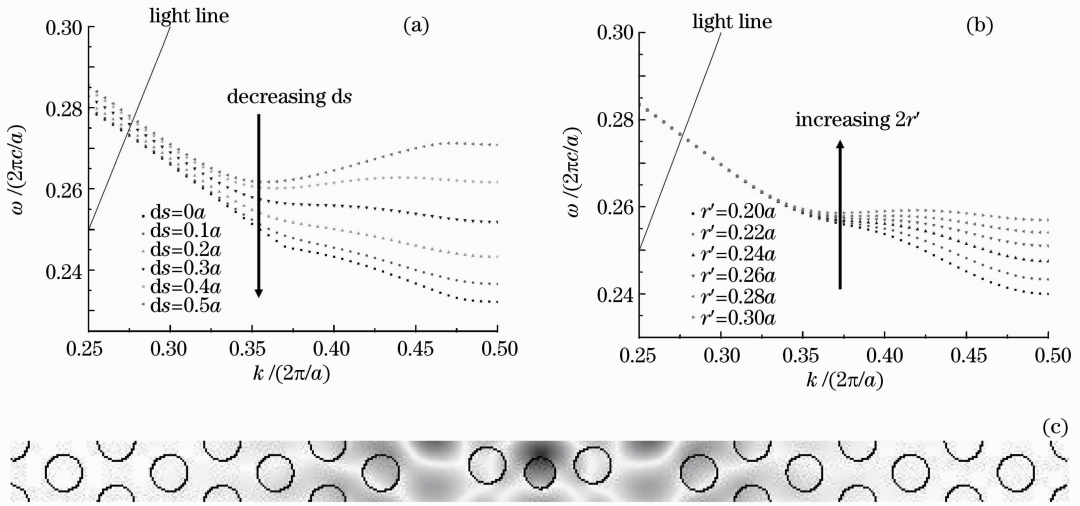


图2 (a)偶模的色散曲线随  $ds$  的变化关系图 ( $r'=0.3a, d_y=1.732a$ ); (b)偶模的色散曲线随  $r'$  的变化关系图 ( $ds=0.35a, d_y=1.732a$ ); (c)波导的静态场分布

Fig. 2 (a) Dispersion curves of the even mode with respect to the argument  $ds$  ( $r'=0.3a, d_y=1.732a$ ); (b) with respect to the argument  $r'$  ( $ds=0.35a, d_y=1.732a$ ); (c) distribution of the static field inside the waveguide

### 3 理想宽带慢光的研究

#### 3.1 器件色散特性分析与啁啾参数的选择

进一步优化结构参数得到的理想座椅状能带如图 3(a) 所示, 从中可以看出在波矢  $k=(0.375 \sim 0.425) \times (2\pi/a)$  范围内色散特性曲线相当平坦, 这表

明在这一波矢范围内群速  $d\omega/dk$  变得极小, 而由图 3(b) 该结构的  $n_g-\omega$  关系图进一步看出在很窄的频率范围内, 其群折射率高达 3823, 此时的各结构参数关系为  $ds=0.372a, r'=0.256a, d_y=1.004 \times 1.732a$ 。

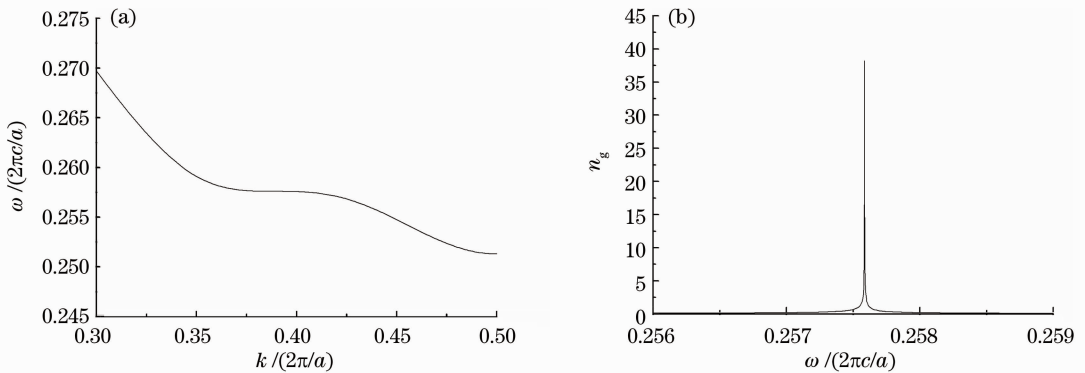


图3 (a)耦合波导的能带结构图和(b)群折射率曲线图

Fig. 3 (a) Energy band structure curve and (b) group refractive index  $n_g$  curve of the photonic crystal coupled waveguides

色散补偿型慢光波导实现宽带慢光的关键在于选择合理的啁啾参数来实现对不同频率光的色散补偿, 该参数应该满足: 对这一参数进行啁啾时, 色散特性曲线的形状基本不变, 而只是作整体的上下平移, 如图 4(a) 所示为结构参数  $d_y$  从  $0.98x(1.732a)$  啁啾到  $1.02x(1.732a)$ , 步长为  $0.002x(1.732a)$  时, 色散特性曲线的变化图, 发现在对  $d_y$

进行啁啾时, 色散曲线形状基本上保持不变, 只是随着参数  $d_y$  的变化作上下平移。进一步由图 4(b) 色散曲线平带的归一化频率与  $d_y$  的关系图可以看出, 平带移动的距离基本上与参数  $d_y$  成线性关系, 这表明可以选择  $d_y$  为啁啾参数, 通过对  $d_y$  的啁啾来实现对不同频率光的色散补偿。

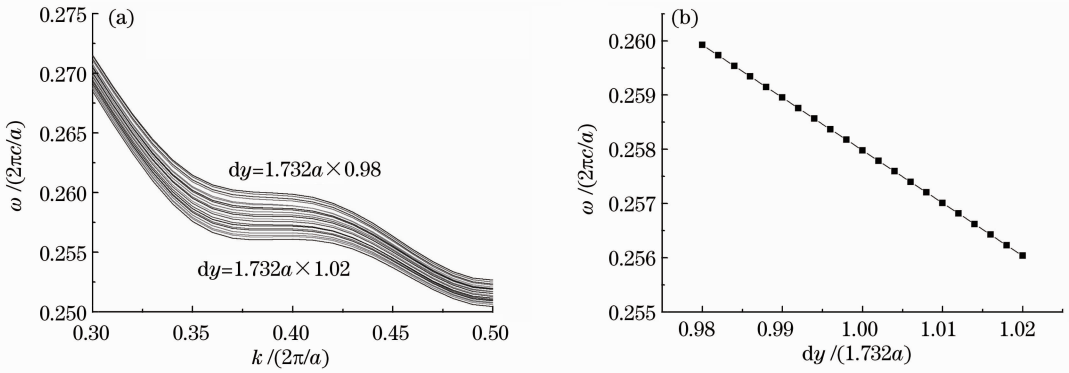


图 4 (a)色散曲线随参数  $dy$  变化的关系图( $ds=0.372a$ ,  $r'=0.256a$ ); (b)平带的慢光归一化频率与  $dy$  的关系图  
Fig. 4 Dependence of the dispersion curves on  $dy$  ( $ds=0.372a$ ,  $r'=0.256a$ ); (b) dependence of the flat-band slow-light normalized frequency on  $dy$

### 3.2 基于 FDTD 数值分析的理论验证

如图 5(a) 所示这里对耦合波导结构进行了 FDTD 仿真验证, 仿真精度为 32, 验证中采用的波导长度为  $150a$ , 由于过大的啁啾范围需要很长的波导, 进行的运算量过大, 因此选择波导结构参数  $dy$  的啁啾范围为  $(0.989 \sim 1.019) \times 1.732a$ , 并采用了耦合波导将光脉冲耦合进光子晶体波导, 左右两侧的耦合波导长度都为  $5a$ , 左侧的耦合波导宽度为  $3.989 \times 1.732a$ , 右侧的耦合波导宽度为  $4.019 \times$

$1.732a$ , 并设置了完全吸收边界条件(PML), 同时在坐标为  $6a$  的 point A 和坐标为  $154a$  的 point B 分别设置了两个光功率探测器, 选用了高斯光源作为验证光源, 其中心角频率为  $0.257584 \times (2\pi c/a)$ , 角频率带宽  $2.2 \times 10^{-3} \times (2\pi c/a)$ , 探测的结果如图 5(b) 所示: A 点探测到的高斯脉冲半峰全宽(FWHM)为  $748 \times (a/c)$ , B 点探测到的高斯脉冲 FWHM 为  $820 \times (a/c)$ , 脉冲展宽为 9.6%, 延迟为  $4150 \times (a/c)$ , 平均群折射率为 28.

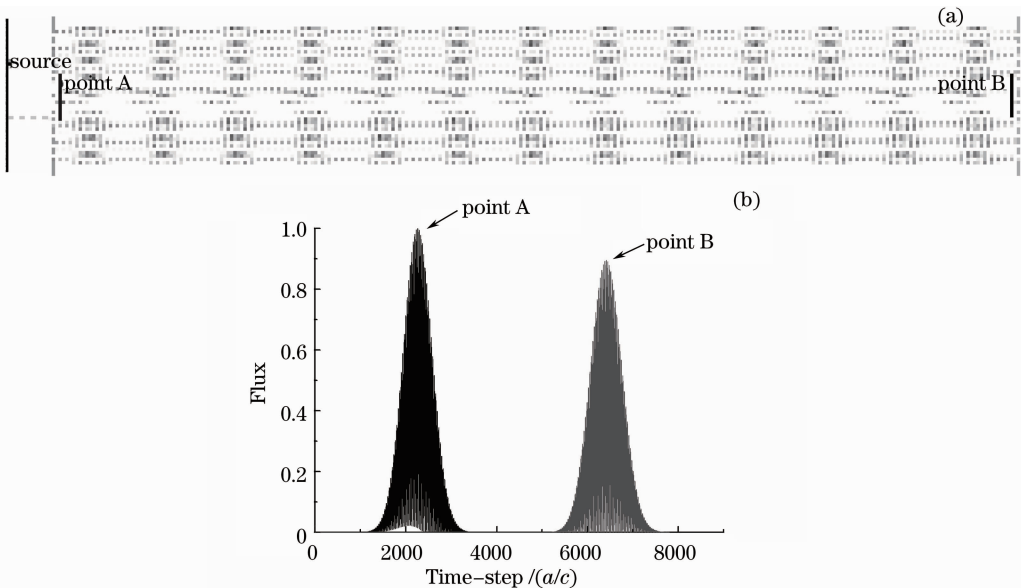


图 5 (a) FDTD 仿真结构示意图, 含耦合波导; (b) A, B 两点探测器接受到的光脉冲波形图, 高斯光源的中心频率为  $0.257584 \times (2\pi c/a)$

Fig. 5 (a) FDTD simulation of the proposed device with coupled straight waveguide; (b) pulse waveform detected by monitor A and monitor B, the central frequency of Gaussian light source is  $0.257584 \times (2\pi c/a)$

## 4 结 论

在完整三角晶格光子晶体中, 通过引入两线缺陷而构成了互补型耦合波导, 进一步优化了结构参

数, 得到了理想的座椅状能带, 并选择了合理的啁啾参数实现了对不同频率光的色散补偿, 最终得到了带宽为 13.24 nm, 平均群折射率为 28 的理想宽带

慢光。与本文研究内容相关的实验平台非常昂贵，目前在亚洲主要是日本在做这方面的实验工作。本文通过理论研究和数值分析给出的理论结果，还有待进一步通过实验来验证。

### 参 考 文 献

- 1 T. F. Krauss. Why do we need slow light[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(8): 448~450
- 2 L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. *Nature*, 1999, **397**(6720): 594~598
- 3 M. Soljacic, S. G. Johnson, S. Fan *et al.*. Photonic crystals slow-light enhancement of nonlinear phase sensitivity [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9): 2052~2059
- 4 T. F. Krauss. Slow light in photonic crystal waveguides[J]. *J. Phys. D*, 2007, **40**(9): 2666~2670
- 5 T. Baba. Slow light in photonic crystals[J]. *Nat. Photonics*, 2008, **2**(8): 465~473
- 6 J. Hou, H. M. Wu, D. S. Citrin. Wideband slow light in chirped slot photonic-crystal coupled waveguides [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(10): 10567~10580
- 7 Qu Lianjie, Yang Yuede, Huang Yongzhen. Slow-light characteristics of photonic crystal waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 01130021
- 8 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): 01130021
- 8 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
- 9 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
- 9 Zhang Dong, Zhao Jianlin, Lü Shuyuan. Slow light waveguide with low group-velocity dispersion and low loss in 2-D photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 01130011
- 10 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
- 10 D. Mori, T. Baba. Wideband and low dispersion slow light by chirped photonic crystal coupled waveguide[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(23): 9398~9408
- 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
- 13 D. S. Gao, Z. Zhou. Nonlinear equation method for band structure calculations of photonic crystal slabs[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(16): 163105

栏目编辑: 韩 峰