

采用渐变圆弓形散射元实现光子晶体结构慢光效应

万 勇¹ 李长红² 云茂金¹ 郭月¹ 杨阳¹ 崔莹¹

(¹ 青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071)
(² 青岛大学自动化工程学院, 山东 青岛 266071)

摘要 采用渐变圆弓形散射元构建线性缺陷波导,并将其应用于光子晶体的慢光效应。在工作波长 $\lambda=1550$ nm时,通过圆弓形散射元单列纵向渐变,获得群折射率在31.4~95.0,低色散($\Delta n_g < 10\%$)带宽在3.7~11.8 nm,无量纲标量积 $n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$ 在0.2268~0.2390,超低色散带宽($\Delta n_g < 1\%$)在2.2~4.8 nm之间的慢光;通过三列圆弓形散射元纵向周期性渐变,获得群折射率在31.6~108.2,低色散($\Delta n_g < 10\%$)带宽在4.0~13.0 nm,无量纲标量积 $n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$ 在0.2650~0.2792,超低色散带宽($\Delta n_g < 1\%$)在2.6~6.8 nm之间的慢光;通过圆弓形散射元横向渐变,获得群折射率在32.1~89.3,低色散带宽在2.9~9.3 nm,无量纲标量积 $n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$ 在0.1670~0.1926,超低色散带宽在1.6~3.5 nm之间的慢光。可见,采用散射元纵向渐变和横向渐变,特别是纵向渐变,可以实现慢光效应,从而为慢光结构设计和应用提供了新的方向。

关键词 材料;圆弓形;散射元;渐变;慢光;色散

中图分类号 TN202; TN203 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1016003

Realization of Slow Light Effect for Photonic Crystal Waveguide Using Graded Eye-Shaped Scatterers

Wan Yong¹ Li Changhong² Yun Maojin¹ Guo Yue¹ Yang Yang¹ Cui Ying¹

(¹ College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)
(² College of Automation Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract With operating wavelength $\lambda=1550$ nm, two-dimensional graded eye-shaped scatterers are applied into photonic crystal waveguide (PCW) for slow light effect in three ways: 1) getting slow light with the group index n_g from 31.4 to 95.0, the low-dispersion bandwidth ($\Delta n_g < 10\%$) from 3.7 nm to 11.8 nm, the scalar product $n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$ from 0.2268 to 0.2390, and the ultralow-dispersion bandwidth ($\Delta n_g < 1\%$) from 2.2 nm to 4.8 nm by grading the single-row eye-shaped scatterers along the longitudinal direction; 2) getting slow light with the group index n_g from 31.6 to 108.2, the low-dispersion bandwidth ($\Delta n_g < 10\%$) from 4.0 nm to 13.0 nm, the scalar product $n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$ from 0.2650 to 0.2792, and the ultralow-dispersion bandwidth ($\Delta n_g < 1\%$) from 2.6 nm to 6.8 nm by grading the triple-row eye-shaped scatterers periodically along the longitudinal direction; 3) getting slow light with the group index n_g from 32.1 to 89.3, the low-dispersion bandwidth from 2.9 nm to 9.3 nm, the scalar product $n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$ from 0.1670 to 0.1926, and the ultralow-dispersion bandwidth from 1.6 nm to 3.5 nm by grading the eye-shaped scatterers along the transverse direction. It means that graded structures, especially the graded eye-shaped scatterers along the longitudinal direction, can achieve slow light effect well and may provide a new way to design and apply slow light.

Key words materials; eye-shaped; scatterers; graded; slow light; dispersion

OCIS codes 160.5298; 130.5296; 130.2035

1 引 言

当光子晶体波导中存在光子禁带时,可以在其

布里渊区边界附近观察到慢光效应^[1-3]。光子晶体慢光结构可以广泛应用于紧凑型光学延时线和光缓

收稿日期: 2013-04-07; 收到修改稿日期: 2013-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(11144007)、山东省基金项目(BS2012CL012)

作者简介: 万 勇(1965—),男,博士,教授,主要从事光子晶体和电磁场理论等方面的研究。

E-mail: wanyong@qdu.edu.cn

存器,并可以在室温下,通过调整结构参数,获得不同工作波长下的低损耗慢光,并集成在微纳结构中^[4]。为了获得具有高群折射率(低群速度)、低色散且带宽较宽的慢光,已经进行了许多成功的研究^[5-10],但是现在绝大多数研究采用的都是常规光子晶体波导结构(PCW),而不是渐变结构。

渐变光子晶体结构是光子晶体结构的一种新发展,它可以在介质材料厚度或者散射元的大小等方面呈规律性的渐变。目前对于渐变结构有许多研究,如对于一维光子晶体,渐变结构可广泛用于增大光波导或光纤的带隙^[11-12],改善结构的相对介电常数和磁导率^[13],产生适用于滤波器的渐变波长导模共振^[14]或作为反射镜的控制带隙^[15]等。对于二维光子晶体,渐变结构可使光线弯曲^[16-18],改变负折射率结构,制作具有负折射率的透镜^[19-20],还可以用于太赫兹量子级联激光器、光子晶体耦合器等^[21-24]。

圆弓形散射元可以通过改变圆弓形散射元的参

数,有效地调整带隙的宽度和位置^[25]。本文采用渐变圆弓形散射元构建二维渐变结构,一种是散射元沿纵向(平行线缺陷方向)渐变,一种是散射元沿横向(垂直于线缺陷方向)微调。结果表明:沿纵向渐变结构的慢光效应比常规波导结构的慢光效应稍微好些,沿横向渐变结构也能产生带宽较宽的慢光。

2 数值模拟

与以前研究中的散射元不同^[25-26],本文采用的散射元是渐变散射元。散射元按三角形晶格结构排列,去掉中间一行构成线缺陷波导,散射元的中心位置保持不变,参数 b 和 c 分别代表圆弓形的长轴半径和短轴半径。图1(a)为单列圆弓形散射元纵向渐变构建的光子晶体波导示意图,以单列为单位参数 b 自右向左逐步增大,步长 $\Delta=0.002a$;图1(b)为另一种圆弓形散射元纵向渐变构建的光子晶体波导示意图,三列为一组,周期性排列,每组之中以单列

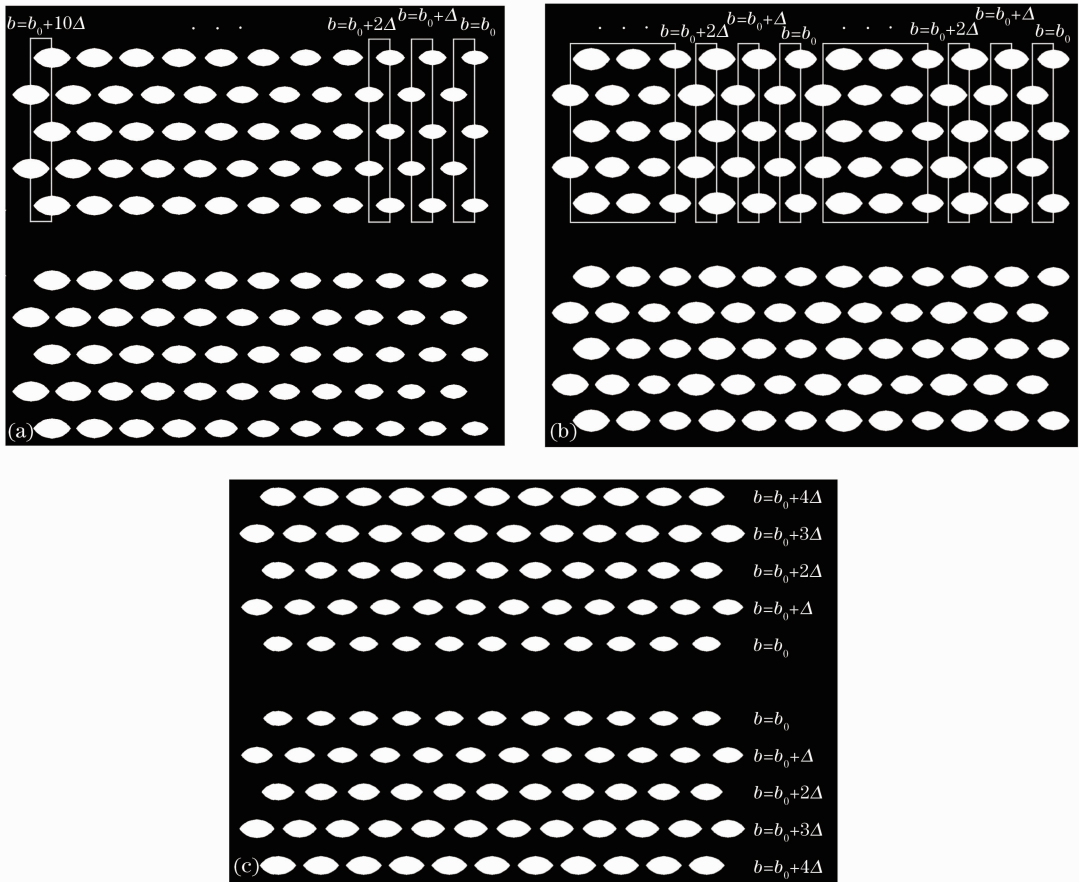


图1 光子晶体波导示意图。(a)由单列圆弓形散射元纵向渐变构建($\Delta=0.002a$);(b)由三列圆弓形散射元纵向周期性渐变构建($\Delta=0.012a$);(c)由圆弓形散射元横向渐变构建($\Delta=0.002a$)

Fig.1 Schematic diagrams of PCW structure. (a) Single-row eye-shaped scatterers longitudinally graded ($\Delta=0.002a$); (b) triple-row eye-shaped scatterers longitudinally periodically graded ($\Delta=0.012a$); (c) eye-shaped scatterers transversely graded ($\Delta=0.002a$)

列为单位,参数 b 自右向左逐步增大,步长 $\Delta = 0.012a$;图 1(c)为圆弓形散射元横向渐变构建的光子晶体波导示意图,以单行为单位,参数 b 自中间向两边逐步增大,步长 $\Delta = 0.002a$ 。

以上模型中的步长是采用平面波展开法(PWE)优化后的结果,步长过大或过小都会使结果偏离最优解。假定二维薄板的折射率为 3.46(硅片),工作波长定为 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ (晶格常数 a 约为 335 nm)。定义参数 $e = 1 - c/b$,用于描述圆弓形与圆形的偏差度($0 \leq e \leq 1$)。选择此参数是因为相对于单独取值, c/b 的值对散射元形状及相应的光学性质更有影响。超晶胞计算采用的是平面波展开法,沿轴向取 11×11 个平面波,离散网格为 $a/64$,本征值的计算精度为 10^{-8} 。

群折射率 n_g 和色散的关系可表示为

$$n_g = \frac{c}{v_g} = c \frac{dk}{d\omega} = n_{\text{eff}} + \omega \frac{dn_{\text{eff}}}{d\omega}, \quad (1)$$

式中 c 为光速, v_g 为光子的群速度, k 为波数, ω 为入射波的中心角频率, n_{eff} 为有效折射率,它们的关系为 $k = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$, λ 为工作波长,其归一化频率 $f = \omega a/(2\pi c)$ 。对慢光而言,通常 $n_g \gg n_{\text{eff}}$,由此可以推出

$$n_g = \frac{a}{2\pi} \frac{dk}{df}. \quad (2)$$

可见,要获得低色散结构,必须要求 n_g 保持稳

定。即在一定的频率范围内, f 和 k 要保持线性变化,这也是衡量低色散的重要标志。

为了获得 n_g 较大且平坦带宽较宽的慢光,可以优化参数 b 和 e 。图 2 为参数 b 和 e 优化后,TE 偶模中 f 和 k 的变化规律。每条曲线中平坦区域代表一个理想的慢光区域,其斜率即为 n_g 的值。图 2(a) 对应图 1(a) 结构中 f 和 k 的关系,图 2(b) 对应图 1(b) 结构中 f 和 k 的关系,图 2(c) 对应图 1(c) 结构中 f 和 k 的关系。相对于常规结构,在 $b = 0.400a$ 左右, k 在 $0.366 \sim 0.468$ 范围有很好的平带慢光^[27]。由图 2(a) 可知,纵向渐变结构 k 在 $0.378 \sim 0.481$ 范围,有很好的平带慢光;由图 2(b) 可知,纵向渐变结构 k 在 $0.380 \sim 0.469$ 范围,有很好的平带慢光;由图 2(c) 可知,横向渐变结构 k 在 $0.368 \sim 0.462$ 范围,也有很好的平带慢光。

图 3 为 n_g 和 f 的函数关系。图 3(a) 对应图 1(a) 结构中 n_g 和 f 的关系,从图 3(a) 中可以看出,当 n_g 分别为 31.4、41.5、59.9、95.0 时,曲线出现较理想的线性区域;图 3(b) 对应图 1(b) 结构中 n_g 和 f 的关系,从图 3(b) 中可以看出,当 n_g 分别为 31.6、42.7、63.8、108.2 时,曲线出现较理想的线性区域;图 3(c) 对应图 1(c) 结构中 n_g 和 f 的关系,当 n_g 分别为 32.1、44.2、64.1、89.3 时,曲线

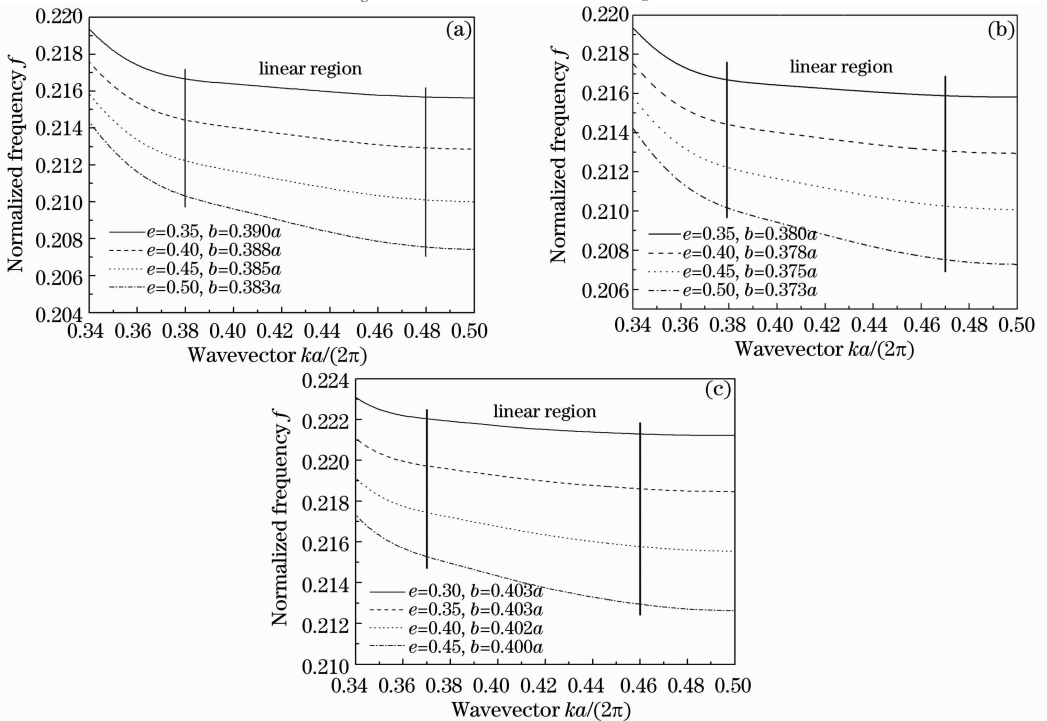


图 2 f 和 k 的关系。(a) 对应图 1(a) 结构; (b) 对应图 1(b) 结构; (c) 对应图 1(c) 结构中
Fig. 2 Relationship of f with k . (a) For the structure in Fig. 1(a); (b) for the structure in Fig. 1(b);
(c) for the structure in Fig. 1(c)

出现较理想的线性区域。

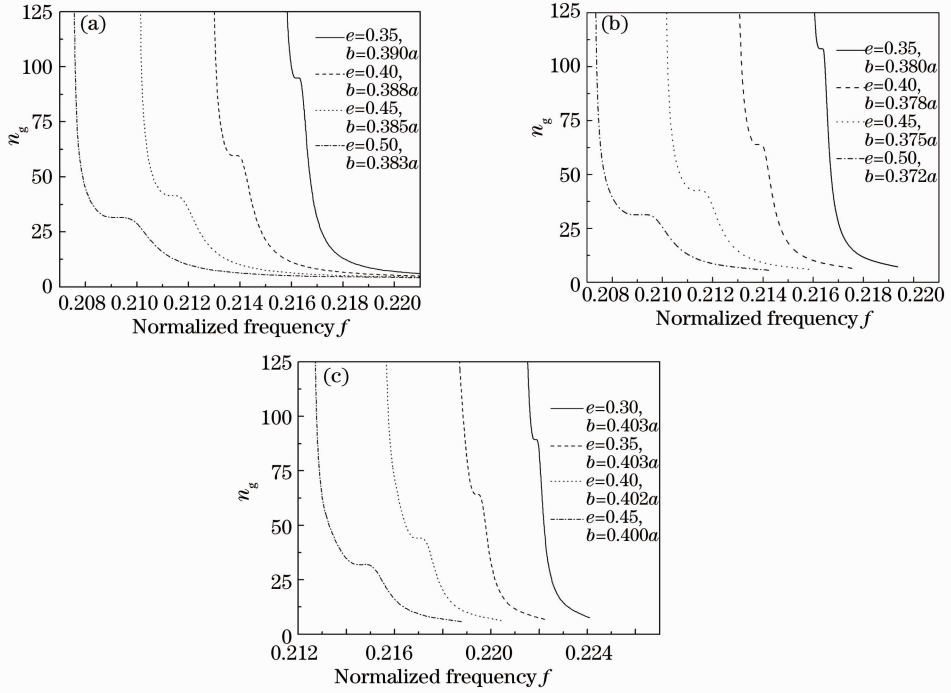


图 3 n_g 和 f 的关系。(a)对应图 1(a)结构；(b)对应图 1(b)结构；(c)对应图 1(c)结构

Fig. 3 Relationship between n_g and f . (a) For the structure in Fig. 1(a); (b) for the structure in Fig. 1(b); (c) for the structure in Fig. 1(c)

为了进一步说明图 2 中工作波长和平带色散之间的关系,可定义群速度色散(GVD)参量 D 如下^[28]:

$$D = \frac{1}{c} \frac{\partial n_g}{\partial \lambda} \quad (3)$$

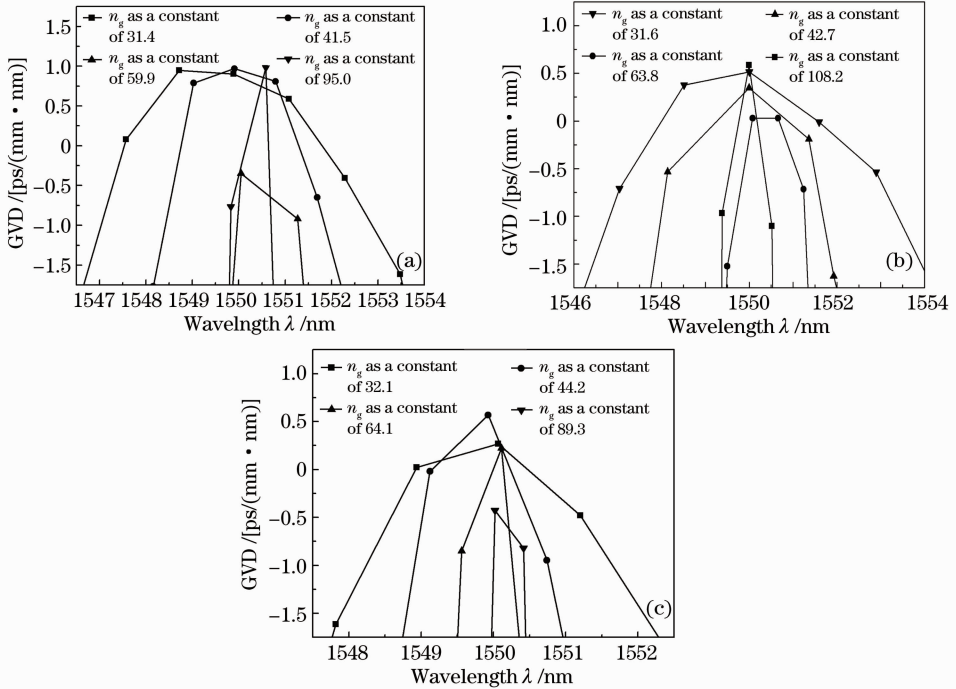


图 4 GVD 参量 D 与波长的关系曲线。(a)对应图 1(a)中的结构；(b)对应图 1(b)中的结构；(c)对应图 1(c)中的结构

Fig. 4 Parameter D of GVD as a function of wavelength, (a) For the structure in Fig. 1(a); (b) for the structure in Fig. 1(b); (c) for the structure in Fig. 1(c)

由(3)式可知,当参量 D 在 $\pm 1 \text{ ps}/(\text{mm}\cdot\text{nm})$ 范围内变化时, $n_g(\lambda)$ 的斜率接近于零。这意味着不管使用什么结构,只要 D 值较小,脉冲信号的传输几乎不失真。图 4 为工作波长 $\lambda=1550 \text{ nm}$ 时,对应 n_g 不同的值,参量 D 与波长的关系曲线。图 4(a) 对应图 1(a) 中的结构,图 4(b) 对应图 1(b) 中的结构,图 4(c) 对应图 1(c) 中的结构。

3 结果和讨论

为了评价低色散慢光,多数研究将 $\pm 10\%$ 作为折射率 n_g 的变化范围称为低色散,并引入无量纲标量积 $n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$ 作为衡量依据,其中 $\Delta\lambda$ 以折射率 $n_g \pm 10\%$ 变化为标准选取。为了进一步区分低色散,将折射率 n_g 的变化范围在 $\pm 1\%$ 的慢光称为超低色散, D 值小于 $\pm 1 \text{ ps}/(\text{mm}\cdot\text{nm})$ 为接近零色散(n_g 的变化范围小于 $\pm 0.5\%$)。幸运的是,渐变光子晶体波导结构可以获得较高的 n_g 值,即较低的群

速度,同时实现低色散、超低色散或接近零色散,特别是纵向渐变结构。

为了进一步说明慢光效果,可以将图 3(a)~(c) 转换成表 1~3。表 1 中, n_g 的变化范围为 31.4~95.0,低色散带宽变化范围为 3.7~11.8 nm,无量纲标量积 $n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$ 在 0.2268~0.2390 之间,超低色散带宽变化范围为 2.2~4.8 nm;表 2 中, n_g 的变化范围为 31.6~108.2,低色散带宽变化范围为 4.0~13.0 nm,无量纲标量积 $n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$ 在 0.2650~0.2792 之间,超低色散带宽变化范围为 2.6~6.8 nm。显然,这些纵向渐变的结果,既好于相关常规慢光波导的研究结果^[29],也优于课题组对圆弓形构建的常规慢光波导的研究结果^[27]。表 3 中, n_g 的变化范围为 32.1~89.3,低色散带宽变化范围为 2.9~9.3 nm, $n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$ 在 0.1670~0.1926 之间,超低色散带宽变化范围为 1.6~3.5 nm。这些结果,却逊于圆弓形构建的常规慢光波导结构的研究结果^[27]。

表 1 与图 1(a) 对应的不同参数下的群折射率和带宽

Table 1 Group index, bandwidth under different parameters for the structure in Fig. 1(a)

e	b	n_g	$\Delta\lambda / (\pm 10\%, \text{nm})$	$\Delta\lambda / (\pm 1\%, \text{nm})$	$n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$
0.35	0.390a	95.0	3.7	2.2	0.2268
0.40	0.388a	59.9	6.0	3.3	0.2319
0.45	0.385a	41.5	8.8	3.6	0.2356
0.50	0.383a	31.4	11.8	4.8	0.2390

表 2 与图 1(b) 对应的不同参数下的群折射率和带宽

Table 2 Group index, bandwidth under different parameters for the structure in Fig. 1(b)

e	b	n_g	$\Delta\lambda / (\pm 10\%, \text{nm})$	$\Delta\lambda / (\pm 1\%, \text{nm})$	$n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$
0.35	0.380a	108.2	4.0	2.6	0.2792
0.40	0.378a	63.8	6.5	3.7	0.2675
0.45	0.375a	42.7	9.7	4.3	0.2672
0.50	0.372a	31.6	13.0	6.8	0.2650

表 3 与图 1(c) 对应的不同参数下的群折射率和带宽

Table 3 Group index, bandwidth under different parameters for the structure in Fig. 1(c)

e	b	n_g	$\Delta\lambda / (\pm 10\%, \text{nm})$	$\Delta\lambda / (\pm 1\%, \text{nm})$	$n_g \times (\Delta\lambda)/\lambda$
0.30	0.403a	89.3	2.9	1.6	0.1670
0.35	0.403a	64.1	4.2	1.9	0.1734
0.40	0.402a	44.2	6.5	3.3	0.1854
0.45	0.400a	32.1	9.3	3.5	0.1926

为了获得接近零色散的结构,需要根据带隙曲线对参数 a 进行微调,以对色散进行补偿。为了便于观察,可以把图 4 中的信息转换到表 4~6 中。表 4~6 分别是图 4(a), (b), (c) 结构不同群折射率下的参数 D 。对应设定工作波长定为 1550 nm,根据(3)式微调参数 a ,使得与 n_g 较小时的群速度色散相似, n_g 较大时的群速度色散也可以较低。例如表 5 中,当 $n_g =$

31.6 时, D 在 $\pm 1 \text{ ps}/(\text{mm}\cdot\text{nm})$ 范围内变化,也可得到慢光带宽为 6.5 nm;即使当 $n_g = 108.2$ 时, D 在 $\pm 1 \text{ ps}/(\text{mm}\cdot\text{nm})$ 范围内变化,得到的慢光带宽为 1.1 nm,这在以前的常规模型中是很难实现的^[27]。另外,表 5 中的 $\Delta\lambda$ 值明显优于表 4 和表 6 的 $\Delta\lambda$ 值,说明第二种纵向渐变结构实现慢光时低色散效果最好。

表 4 对应图 1(a)结构中不同群折射率下的参数 D Table 4 Parameter D under different group indexes for the structure in Fig. 1(a)

n_g	a /nm	$ D $ / [ps/(mm·nm)]	$\Delta\lambda$ /nm
31.4	324.4	≤ 1.0	5.8
41.5	327.7	≤ 1.0	3.4
59.9	331.5	≤ 1.0	1.3
95.0	335.2	≤ 1.0	0.9

表 5 对应图 1(b)结构中不同群折射率下的参数 D Table 5 Parameter D under different group indexes for the structure in Fig. 1(b)

n_g	a /nm	$ D $ / [ps/(mm·nm)]	$\Delta\lambda$ /nm
31.6	324.1	≤ 1.0	6.5
42.7	327.7	≤ 1.0	3.7
63.8	331.4	≤ 1.0	1.5
108.2	335.3	≤ 1.0	1.1

表 6 对应图 1(c)结构中不同群折射率下的参数 D Table 6 Parameter D under different group indexes for the structure in Fig. 1(c)

n_g	a /nm	$ D $ / [ps/(mm·nm)]	$\Delta\lambda$ /nm
32.1	332.7	≤ 1.0	3.4
44.2	336.3	≤ 1.0	1.9
64.1	340.1	≤ 1.0	0.7
89.3	343.9	≤ 1.0	0.4

需要说明的是:1) 采用渐变形圆弓形散射元构建二维渐变结构,旨在提出一种慢光研究的新方向。本文仅提到纵向渐变的两种方式可以获得较好的慢光效应,其实渐变模式可以很多,比如以相邻两列为单位,参数 b 自右向左以相近、但不同的步长 Δ_1 和 Δ_2 逐步增大(或减少);也可以超过三列为一组周期排列,每组之中以单列为单位参数 b 自右向左逐步增大(或减少),通过优化参数,而获得较理想的慢光结构。2) 由于光子晶体的无量纲性,当参数 a 随着工作波长 λ 等比增加或减少而其他条件不变时, $\Delta\lambda$ 与参数 a 成正比,如 $\Delta\lambda = 2.9$ nm 相对应的晶格常数是 $a = 335$ nm, 那么 $\Delta\lambda' = 290$ nm 相对应的晶格常数是 $a' = 33.5$ μm , 这样结构可以很容易应用到不同的频率范围。另外,加工精度一直是制约着光子晶体研究和应用的重要因素。相对于单纯禁带结构,慢光结构对于加工精度要求更高,所以慢光实际结构制作和测试研究相对较少,这在很大程度上制约了慢光结构的研究和应用^[27-28]。值得庆幸的是,近几年微加工技术发展迅速,在 2010 年硅片的加工精度为 10 nm,而在 2012 年这一精度已经达到 1 nm^[30],从而为该设计方案供了实验可行性。

4 结 论

通过采用二维渐变结构实现了慢光效应。结果显示:渐变光子晶体波导结构可以在获得较高的 n_g 值(即较低的群速度)的同时,实现低色散、超低色散或接近零色散几种情况下的慢光效应,特别是纵向渐变结构的结果更为理想。说明二维渐变结构不仅可以用于负折射率的透镜或制作光子晶体耦合器,而且可以用于实现慢光效应。这一研究为慢光结构设计和应用提供了新的途径和方向。

参 考 文 献

- Z Shi, R W Boyd, D J Gauthier, *et al.*. Enhancing the spectral sensitivity of interferometers using slowlight media [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(8): 915-917.
- T Baba. Slow light in photonic crystals [J]. *Nat Photon*, 2008, 2(8): 465-473.
- N Ozaki, Y Kitagawa, Y Takata, *et al.*. High transmission recovery of slow light in a photonic crystal waveguide using a hetero groupvelocity waveguide [J]. *Opt Express*, 2007, 15(13): 7974-7983.
- S Assefa, S J McNab, Y A Vlasov. Transmission of slow light through photonic crystal waveguide bends [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(6): 745-747.
- R J P Engelen, Y Sugimoto, Y Watanabe, *et al.*. The effect of higher-order dispersion on slow light propagation in photonic crystal waveguides [J]. *Opt Express*, 2006, 14(4): 1658-1672.
- M D Settle, R J P Engelen, M Salib, *et al.*. Flatband slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and terahertz bandwidth [J]. *Opt Express*, 2007, 15(1): 219-226.
- M D Nielsen, N A Morbensen, J R Folkenberg, *et al.*. Mode-field radius of photonic crystal fibers expressed by the V parameter [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(23): 2309-2311.
- N A Mortensen, M Stach, J Broeng, *et al.*. Multi-mode photonic crystal fibers for VCSEL based data transmission [J]. *Opt Express*, 2003, 11(17): 1953-1959.
- Zhang Dong, Zhao Jianlin, Lü Shuyuan. Slow light waveguide with low group-velocity dispersion and low loss in 2D photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0113001.
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): 0113001.
- 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.
- Z E Sang, Z Y Li. Properties of defect modes in one-dimensional photonic crystals containing a graded defect layer [J]. *Opt Commun*, 2007, 273(1): 162-166.
- D W Dobbs, I Gershkovich, B T Cunningham. Fabrication of a graded-wavelength guided-mode resonance filter photonic crystal [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(12): 123113.
- S S Peng, Z J He, H Jia, *et al.*. Acoustic far-field focusing effect for two-dimensional graded negative refractive-index sonic crystals [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 96(26): 263502.
- E Centeno, D Cassagne. Graded photonic crystals [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(17): 2278-2280.
- E Centeno, E Akmansoy, K Vynck, *et al.*. Light bending and quasi-transparency in metallic graded photonic crystals [J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*,

- 2010, 8(2): 120–124.
- 16 K Do, X Roux, D Marris-Morini, *et al.*. Experimental demonstration of light bending at optical frequencies using a non-homogenizable graded photonic crystal [J]. *Opt Express*, 2012, 20 (4): 4776–4783.
- 17 Q Wu, J M Gibbons, W Park. Graded negative index lens by photonic crystals [J]. *Opt Express*, 2008, 16 (21): 16941–16949.
- 18 K Deng, Y Q Ding, Z J He, *et al.*. Graded negative index lens with designable focal length by photonic crystal [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2009, 42(18): 185505.
- 19 R Zengerle, P Hoang. Wide-angle beam refocusing using negative refraction in non-uniform photonic crystal waveguides [J]. *Opt Express*, 2005, 13(15): 5719–5730.
- 20 F Hudelist, R Buczynski, A J Waddie, *et al.*. Design and fabrication of nano-structured gradient index microlenses [J]. *Opt Express*, 2009, 17 (5): 3255–3262.
- 21 Y Chassagneux, R Colombelli, W Maineult, *et al.*. Graded photonic crystal terahertz quantum cascade lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 96(3): 031104.
- 22 B Vasic, G Isic, R Gajic, *et al.*. Controlling electromagnetic fields with graded photonic crystals in metamaterial regime [J]. *Opt Express*, 2010, 18(19): 20321–20333.
- 23 A O Cakmak, E Colak, H Caglayan, *et al.*. High efficiency of graded index photonic crystal as an input coupler [J]. *J Appl Phys*, 2009, 105(10): 103708.
- 24 H Chien, C Lee, H Chiu, *et al.*. The comparison between the graded photonic crystal coupler and various couplers [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(14): 2570–2574.
- 25 Y Wan, Z Y Cai, Q Li, *et al.*. Simulation and fabrication of THz waveguides with silicon wafer by using eye-shaped pillars as building blocks [J]. *Appl Phys A*, 2011, 102(2): 373–377.
- 26 Wan Yong, Yun Maojin, Pan Shudi, *et al.*. Fabrication and characterization of THz waveguides with silicon wafer by using cylinder segments as scatterers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31 (12): 1222004.
- 万 勇, 云茂金, 潘淑娣, 等. 圆弓形散射元构建的二维硅基太赫兹波导的制备和表征 [J]. *光学学报*, 2011, 31 (12): 1222004.
- 27 Wan Yong, Fu Kai, Yun Maojin, *et al.*. Slow light effect with low group velocity and low dispersion by adjusting parameters of cylinder-segment scatterers [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0106002.
- 万 勇, 付 凯, 云茂金, 等. 调整圆弓形散射元参数实现低群速和低色散的慢光效应[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0106002.
- 28 Yong Wan, Kai Fu, Changhong Li, *et al.*. Improving slow light effect in photonic crystal line defect waveguide by using eye-shaped scatterers [J]. *Opt Commun*, 2013, 286(1): 192–196.
- 29 J Liang, L Y Ren, M J Yun, *et al.*. Wideband slow light with ultralow dispersion in a W1 photonic crystal waveguide [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(31): 98–103.
- 30 C P Reardon, I H Rey, K Welna, *et al.*. Fabrication and characterization of photonic crystal slow light waveguides and cavities [J]. *J Vis Express*, 2012, 30(69): e50216.

栏目编辑: 王晓琰