

调整圆弓形散射元参数实现低群速和低色散的慢光效应

万 勇 付 凯 云 茂 金 郭 月 夏 临 华

(青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071)

摘要 圆弓形散射元具有各向异性和多个可控自由度的特点。采用平面波展开方法,通过长轴微调、短轴变化和散射元转动几个方面,优化了光子晶体线性缺陷波导结构,实现了高群折射率和低色散的慢光效应并进行了模拟。结果表明,通过调整长轴和短轴变化,可以获得带宽在 10.1~1.1 nm,折射率为 36.5~287.5 的低色散慢光;通过散射元转动,可以获得带宽在 11.4~0.8 nm,折射率为 45.5~293.7 的低色散慢光。上述方法还可以获得超低色散和接近零色散效果的慢光。由此表明,选择合适的散射元和调整散射元参数,可以有效地实现高群折射率和低色散的慢光效应。

关键词 散射;圆弓形;散射元;慢光;色散;光子晶体;波导

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0106002

Slow Light Effect with Low Group Velocity and Low Dispersion by Adjusting Parameters of Cylinder-Segment Scatterers

Wan Yong Fu Kai Yun Maojin Guo Yue Xia Linhua

(College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract As cylinder-segment scatters have the features of anisotropy and multiple controllable degrees of freedom. With the plane-wave expansion method, the slow light effect with high group refractive index and low dispersion can be generated by optimizing the structures of photonic crystal waveguide with line defect, such as changing the length of major axis or minor axis, or rotating scatterers relative to the direction of line defect. Simulation results show that slow lights with band width from 10.1 nm to 1.1 nm and group refractive index from 36.5 to 287.5 are achieved by changing the lengths of major axis or minor axis; slow lights with band width from 11.4 nm to 0.8 nm and group refractive index from 45.5 to 293.7 are gained by rotating scatterers. Moreover, slow lights with ultralow dispersion, even near zero dispersion, can also be obtained by these methods, which shows that choosing suitable scatterers and adjusting their parameters can efficiently achieve slow light effect with high group refractive index and low dispersion.

Key words scattering; cylinder-segments; scatterers; slow light; dispersion; photonic crystal; waveguide

OCIS codes 160.5298; 130.5296; 130.2035

1 引 言

慢光具有较低的群速度,可以广泛应用于光学延时线和缓冲器等领域。光子晶体慢光波导,由于具有结构微小紧凑、传输损耗少和可室温运行等特点,在全光通信系统和全光信息处理的应用中具有较大的优势^[1-4]。光子晶体慢光波导主要有:线缺陷波导和点缺陷耦合波导两种形式。但是,在获得

较低的群速度时,二者都遇到有较大色散存在的问题。研究发现,线缺陷波导中的光波群速度一般较大,但色散相对较小;点缺陷耦合波导,可以实现较小的群速度,但其色散较大^[5,6]。所以,无论何种情况下,要实现较理想的慢光效应,必须有效地减少色散。

为了有效获得带宽较宽、色散较低慢光效果,对两种缺陷结构的波导都做了许多成功的尝试:1)

收稿日期: 2012-08-13; 收到修改稿日期: 2012-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(11144007)资助课题。

作者简介: 万 勇(1965—),男,博士,教授,主要从事光子晶体和电磁场等方面的研究。E-mail: wanyong@qdu.edu.cn

对线缺陷波导,可以增加或减少线缺陷的宽度或在
线缺陷中间加平行缝隙^[7~9],调整空气孔的半
径^[10~13],引入啁啾波导或异质结构^[14~16],将靠近线
缺陷的两排空气孔沿波导方向平移并改变其间距的
大小^[17~21],将波导缺陷注入微流体等^[22];2)对点缺
陷耦合波导,可以只调整微腔半径或者在调整微腔
半径同时调整其周围空气孔的半径^[23~26],改变相邻
微腔的距离或双缺陷微腔^[27~30],同时改变缺陷柱半
径及其周围介质柱的位置等^[31,32]。有些研究将两
种缺陷模式结合起来,如在线缺陷波导中引入高品
质因子 Q 的多个微腔或者单一量子点微腔^[33,34]。
但是,上述研究主要集中在结构的周期性排列方面,
所采用的散射元主要是圆柱形介质柱或空气孔,只
有少量研究改变了散射元的形状^[16,35]。

万勇等^[36,37]研究中,提出了一种新型散射
元——圆弓形散射元,它具有可以从多个自由度调
控和两个侧面的曲率不变(引起的色散小)等特点。
本文将圆弓形散射元应用到光子晶体线缺陷波导,
并通过调整长轴和短轴的大小、偏转长轴与线缺陷
夹角等,在低色散、超低色散和接近零色散 3 种情
况下,获得较高群折射率,从而获得较低的群速度,实
现慢光波导结构的优化。

2 模 拟

图 1 为圆弓形散射元构建的线缺陷波导示意
图。图 1(a)中长轴平行于线缺陷方向;图 1(b)中长
轴与线缺陷方向的夹角成 θ 。为了研究方便,两种
波导都为三角晶格结构,线缺陷在结构的中心位置。
假设材料为硅片(折射率 $n_{\text{si}} = 3.5$),工作波长为
1550 nm,设结构的晶格常数为 a ,参数 b 和 c 分
别为圆弓形散射元长轴和短轴的半径,并定义参数
 $e = 1 - c/b$, e 可以从 0 到 1 变化。

模拟过程大致分为 3 个步骤:1) 根据晶格常数
 a ,调整参数 b 和 e (从而决定 c),寻找结构合适的带
隙结构及禁带结构中的导模;2) 在参数 e 一定的
情况下,微调参数 b ,寻求宽而平整的慢光导模;3) 改
变参数 θ ,并微调参数 b ,寻求宽而平整的慢光导模。
超元胞的计算采用的是平面波展开法(PWE),按轴
向选取 32×32 个平面波,离散网格采用 $a/64$,本征
值的计算精度为 10^{-8} 。

众所周知,群折射率 n_g 和色散的关系可表示为

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

式中 n_{eff} 为群有效折射率, ω 为入射波(脉冲)的中心

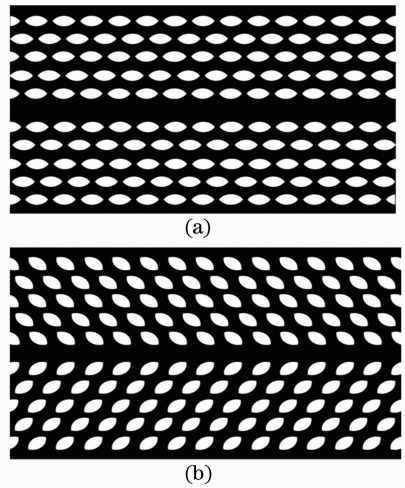


图 1 圆弓形散射元构建的线缺陷波导示意图。(a)长轴
平行于线缺陷方向;(b)长轴与线缺陷方向的夹角 θ
Fig. 1 Schematic diagram of line defect waveguide with
cylinder-segment scatterers. (a) Major axis
parallel to the direction of line defect; (b) angle θ
of major axis and the direction of line defect

角频率,它们的关系为 $k = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$, λ 为工作频率的
波长,其归一化频率 $f = \omega a / (2\pi c_L)$, c_L 为光速。对
慢光而言,通常 $n_g \gg n_{\text{eff}}$ 。在此条件下,由(1)式可得

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

可见,要获得低色散的结构,必须要求 n_g 保持稳定,
即在一定的频率范围内, f 和 k 保持线性变化。

2.1 长轴平行于线缺陷方向结构的模拟

在长轴平行于线缺陷方向的波导中,可以通过
调整参数 a 、 b 和 e ,同时获得 n_g 较大、带宽较大而平
整的慢光。图 2(a) 为 TE 偶模中 f 和 k 随参数 b 和 e
的变化规律。每条曲线中平坦区域代表着一个理想
的慢光区域,其斜率就是 n_g 的大小。可见 $b =$
 $0.400a$ 附近,圆柱形空气孔($e = 0$)没有很好的平坦
区域,而圆弓形散射元 e 在 $0.37 \sim 0.47$ 的范围内都
有很好的线性区域。

图 2(b) 对应图 1(a) 结构中 n_g 和 f 之间的关
系,同样的,圆柱形空气孔没有很好的 n_g 值(最右边
曲线),而圆弓形散射元的 n_g 曲线分别在 36.5,
56.1,96.7,157.5 和 287.5 时,出现平坦区域(低色
散慢光区域),是一组较理想的结果。

图 2(b) 中折射率 n_g 和工作频率的关系,并不
随结构尺度变大或缩小而改变。正因为如此,可以
根据工作频率减小或增加,相应地放大或缩小结构,
以获得低色散的结构。其关系可用 $a = f\lambda$ 表示。
以 $\lambda = 1550$ nm 为例,参数 a 应该在 335 nm 左右。

但是要获得接近零色散的结构,还需要根据其禁带曲线,对参数 a 进行微调。如在 $n_{g1} = 36.5$ 时,取 $a_1 = 331.5$ nm;在 $n_{g2} = 56.1$ 时, $a_2 = 337.6$ nm;在

$n_{g3} = 96.7$ 时,取 $a_3 = 339.6$ nm;在 $n_{g4} = 157.5$ 时,取 $a_4 = 344.0$ nm 等。即参数 a 的值可根据 f , 在 $331.5 \sim 344.0$ nm 之间调整。

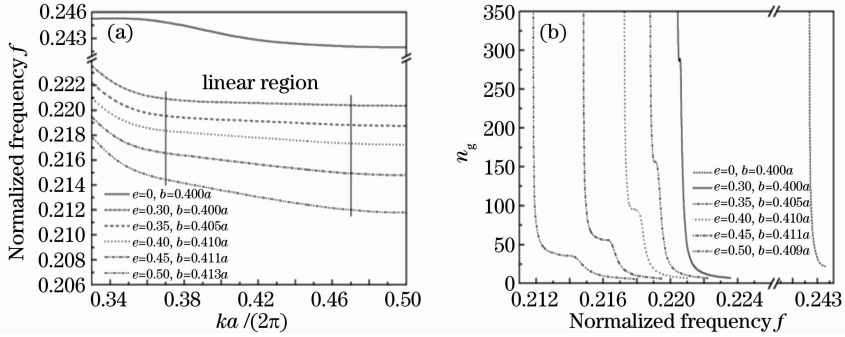


图 2 (a)图 1(a)结构中 f 和 k 之间的关系;(b)图 1(a)结构中 n_g 和 f 之间的关系

Fig. 2 (a) Relationship between f and k for the Fig. 1(a) structure; (b) relationship between n_g and f for the Fig. 1 (a) structure

为了更好地分析图 2(b)中低色散特性和慢光带宽 $\Delta\lambda$ 之间的关系,可定义群速度色散(GVD)参量 D 来表征色散与波长的关系^[18],即

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

根据(3)式,如果 $n_g(\lambda)$ 的斜率接近于零,参量 D 也趋近于零,波导结构的色散就接近于零,即零色散。图 3 为工作波长 $\lambda = 1550$ nm 时,不同 n_g 情况下,参量 D 随波长的变化规律。可见,在工作波长附近相应的 D 值很小,接近于零。另外, n_g 越小的曲线,其变化也较平缓。

2.2 长轴与线缺陷方向的夹角成 θ 时对称结构的模拟

由于圆弓形散射元具有轴对称的特点,可通过长轴相对于线缺陷方向偏转 θ 夹角,并微调参数 b 和 e ,获得 n_g 较大、带宽较大而平整的慢光。只改变夹角 θ ,慢光效应也会改变。

图 4(a)为 $\theta = 30^\circ$ 时,TE 偶模中 f 和 k 随参数 b 和 e 的变化规律,可见 $b = 0.440a$ 附近,圆弓形散射

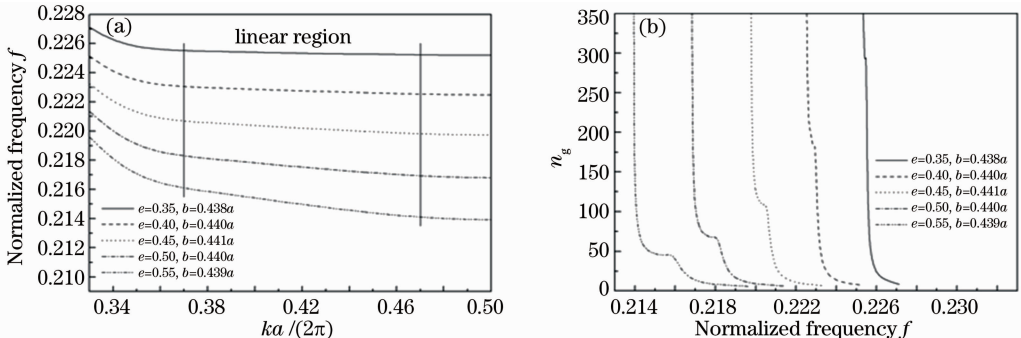


图 4 对应图 1(b)结构中 $\theta = 30^\circ$ 时(a) f 和 k 及(b) n_g 和 f 之间的关系

Fig. 4 Relationship (a) between f and k and (b) between n_g and f for the Fig. 1(b) structure when $\theta = 30^\circ$

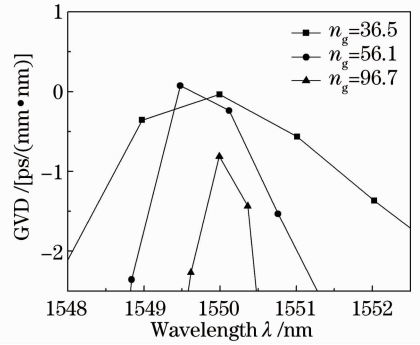


图 3 对应图 1(a)结构中参量 D 随不同 n_g 随波长的变化规律

Fig. 3 D as a function of wavelength for the Fig. 1(a) structure under different n_g

元 e 在 $0.35 \sim 0.55$ 的范围有很好的线性区域。图 4(b)对应图 1(b)结构中 n_g 和 f 之间的关系,圆弓形散射元的 n_g 值分别为 $45.5, 67.8, 108.7, 182.5$ 和 293.7 ,明显高于图 2(b)中的结果。

长轴相对于线缺陷方向偏转 $\theta = 30^\circ$ 后,参量 D 的分布范围也明显减小,特别是 n_g 分别为 45.5 ,

67.8, 108.7 的 3 条线,在工作波长附近相应的 D 值很小(多数区域小于 1),如图 5 所示。可见,虽然这组 n_g 值分别高于图 3 中的 n_g 值,但是其超低色散性能却好于图 3。

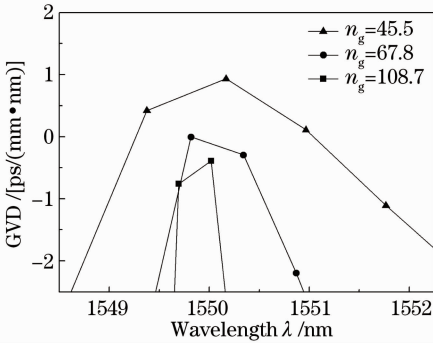


图 5 对应图 1(b)结构中 $\theta=30^\circ$ 时,参量 D 随波长的变化规律

Fig. 5 D as a function of wavelength for the structure in Fig. 1(b) when $\theta=30^\circ$

3 结果和讨论

3.1 长轴平行于线缺陷方向结构的结果分析

为了评价低色散慢光,多数研究将 $\pm 10\%$ 作为折射率 n_g 的变化范围并定义为低色散范围^[18]。为了进一步区分低色散,本研究将折射率 n_g 的变化范围在 $\pm 1\%$ 的慢光作为超低色散, D 值小于 ± 2 ps/(mm·nm) 为接近零色散(n_g 的变化范围小于 $\pm 0.5\%$)。

用圆弓形散射元代替圆柱形空气孔,在长轴平行于线缺陷方向时,可以获得较好的慢光效应。为了更清楚描述这一结果,可将图 2(b) 的数据列于表 1。表 1 中, n_g 的最大值是 287.5,变化在 $\pm 1\%$ 的最大带宽是 4.1 nm,变化在 $\pm 10\%$ 的最大带宽是 10.1 nm。特别是后 3 组数值具有高折射率和超低色散宽带的特性,具有很好的应用价值。

表 1 图 1(a) 结构中不同参数下的 n_g 和 $\Delta\lambda$

Table 1 Group indexes and bandwidths under different parameters for the structure in Fig. 1(a)

e	b	n_g	$\Delta\lambda$ ($\pm 10\%$)/nm	$\Delta\lambda$ ($\pm 1\%$)/nm
0.30	0.400a	287.5	1.1	0.6
0.35	0.405a	157.5	2.4	1.1
0.40	0.410a	96.7	4.8	2.2
0.45	0.411a	56.1	7.5	3.0
0.50	0.409a	36.5	10.1	4.1

这一现象的机理如下:光子晶体波导的慢光色散主要分为向后散射和漫反射两部分。对于圆柱孔形散射元其向后散射的影响较大,所以要通过减小

线缺陷宽度,采用啁啾波导,调整空气孔的半径,或者将圆柱孔用椭圆代替等来减小向后散射的影响。但是,同一结构内采用不同的散射元,会增加漫反射,从而影响慢光效应。圆弓形散射元可以通过调整参数 b 和 e 控制向后散射,而单一的圆弓形散射元结构还可以减少漫反射,从而大大降低了色散的影响。这也是采用圆弓形散射元可以获得较大平整带宽(超低色散)和较大群折射率的原因,如图 2 所示。

另外,模拟计算表明,相对于椭圆,圆弓形散射元不仅制作简单,其禁带宽度和慢光效应也优于椭圆。例如,对于相同的 n_g 值,椭圆散射元的慢光带宽比圆弓形散射元的小,以 $n_g=56.1$ 为例,前者在 $\pm 10\%$ 的带宽为 6.8 nm,而后者的带宽为 7.5 nm。同样的,对于相同的慢光带宽 7.5 nm,椭圆散射元的 n_g 值为 43.2,比圆弓形散射元的 n_g 值小。

为了获得近乎零散射的效果,有时需要对参数 a 做一些更精准的微调。以工作波长 $\lambda=1550$ nm 为例,需要对参数 a 进行微调,如在 $n_{g1}=36.5$ 时,取 $a_1=331.5$ nm;在 $n_{g2}=56.1$ 时, $a_2=335.0$ nm 等,以达到接近零色散的效果。

为了分析其接近零色散的区间,将图 4 中参数 D 的数据示于表 2。由表 2 可知,虽然 D 值随 n_g 增大而增大, $n_g=36.5$ 时,在 D 变化小于 ± 1 ps/(mm·nm) 的范围内,慢光带宽超过 2.9 nm;即使在 $n_g=96.7$, D 变化小于 ± 2 ps/(mm·nm) 的范围内,慢光带宽也超过 0.7 nm,这些结构由于具有超低的 D 值,在内部传输的光脉冲几乎无失真。

表 2 图 1(a) 结构中不同 n_g 对应的参数 D 和 $\Delta\lambda$

Table 2 Parameter D and $\Delta\lambda$ for different group indexes for structure in Fig. 1(a)

n_g	a /nm	$ D $ /[ps/(mm·nm)]	$\Delta\lambda$ /nm
36.5	331.5	≤ 1.0	2.9
56.1	335.0	≤ 1.5	1.7
96.7	337.6	≤ 2.0	0.7

3.2 长轴与线缺陷方向的夹角成 θ 时对称结构的结果分析

圆弓形散射元通过长轴相对于线缺陷方向偏转 θ 夹角,有两种形式:一种是向单一方向偏转;另一种是以线缺陷为对称轴的偏转。优化参数后,二者在 n_g 值方面差异不大,但是后者慢光曲线中的平坦区域比前者好很多,所以本文采用了以线缺陷为对称轴偏转的方式。随着 θ 角的变化,慢光的效应不同,获得理想慢光的条件也不同。模拟表明, θ 在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的范围内,都有较好的慢光效应。随着 θ 角

的变化,由于禁带和慢光导模都会发生变化,可以通过调节参数 b ,来获得群折射率和平坦带宽好于长轴平行于线缺陷的结构。

表 3 是由图 4(b)的数据转化而来的,表中不仅 n_g 值都有所增大(最大值为 293.7),低色散和超低色散(n_g 变化分别在 $\pm 10\%$ 和 $\pm 1\%$)的平坦带宽也较大。如对比超低色散带宽:在表 1 中, $n_g = 36.5$ 对应的超低色散带宽为 4.1 nm, $n_g = 56.1$ 对应的超低色散带宽为 3.0 nm, $n_g = 96.7$ 对应的超低色散带宽为 2.2 nm;表 3 中, $n_g = 45.5$ 对应的超低色散带宽为 5.6 nm, $n_g = 67.8$ 对应的超低色散带宽为 2.6 nm, $n_g = 108.7$ 对应的超低色散带宽为 1.3 nm。

表 3 对应图 1(b)结构中 $\theta = 30^\circ$ 时不同参数下的 n_g 和 $\Delta\lambda$
Table 3 Group indexes and bandwidths under different parameters for the structure of Fig. 1(b) structure when $\theta = 30^\circ$

e	b	n_g	$\Delta\lambda$	
			($\pm 10\%$) / nm	($\pm 1\%$) / nm
0.35	0.438a	293.7	0.8	0.4
0.40	0.440a	182.5	1.8	0.7
0.45	0.441a	108.7	3.5	1.3
0.50	0.440a	67.8	5.6	2.6
0.55	0.439a	45.5	11.4	5.6

为了进一步比较接近零色散的区间,将图 5 后 3 组的数据示于表 4。由表 4 可知,虽然 n_g 值相对于表 2 增大了,但表中 D 值都没有超出 ± 2 ps/(mm·nm)的范围; $n_g = 45.5$ 对应的带宽为 2.8 nm, $n_g = 67.8$ 对应的带宽为 1.2 nm, $n_g = 108.7$ 对应的带宽为 0.6 nm,这些区域都是接近零色散的,在已有的研究成果中也是难得的^[13,15]。

表 4 对应图 1(b)结构中 $\theta = 30^\circ$ 时不同 n_g 对应的参数 D 和 $\Delta\lambda$

Table 4 Parameter D and $\Delta\lambda$ of different group indexes for the structure of Fig. 1(b) structure when $\theta = 30^\circ$

n_g	a / nm	$ D $ / [ps/(mm·nm)]	$\Delta\lambda$ / nm
45.5	334.1	≤ 1.0	2.8
67.8	337.7	≤ 1.5	1.2
108.7	341.6	≤ 2.0	0.6

3.3 说 明

尽管是模拟研究,本文仍想对实际制作的误差因素进行简要说明。实际制作中,有两个因素可能会影响慢光效应:一是实验加工精度,二是硅片厚度偏差。以 $n_g = 36.5$ 为例,图 6 中实线代表的是没有制作误差的 n_g 曲线,其余 4 条线分别是实验加工参数 b 误差为 +1.0, +0.5, -0.5, -1.0 nm 的 n_g 曲

线。由图 6 可知,几条曲线的平坦区域绝大部分是重合的,说明在较小加工误差内,不管误差是正还是负,对慢光的影响均不大。同样,在三维模拟中,初设的硅片厚度都是 235 nm(约 $0.7a$),如将硅片厚度由 235 nm 增加或减少 1 nm,慢光曲线几乎不变。只有厚度改变超过 10 nm 时,慢光效应才会发生红移(或蓝移),这与其他研究结果一致^[38]。

但是,目前一般光刻的实验误差在 ± 10 nm,这对于图 6 中的慢光效应影响是很大的。模拟表明,当晶格常数 $a = 335$ nm 时,加工误差大于 ± 2 nm,慢光的宽带开始明显减小。所以,晶格常数为 $a = 335$ nm 的结构要实现低色散、低群速和较宽带宽的慢光,在实际制作过程是很困难的。

但是,光子晶体的晶格常数及其误差可以根据工作波长等比例放大或缩小,对于晶格常数 a 远大于 335 nm 的结构,如在先前的太赫兹波导研究中^[36,37],晶格常数为 $a = 120 \mu\text{m}$,只要加工误差小于 ± 670 nm(等同于 $a = 335$ nm 时,加工误差小于 ± 1 nm),结构的慢光效应就不会产生太大影响。目前,实际的实验加工误差为 ± 10 nm,远远超出了对加工精度的要求,所以本文研究的结构适合在太赫兹等工作波长相对较大的电磁波中实际应用。另外,随着技术进步,实际加工误差会越来越小,这一结构的适合范围也会更广。

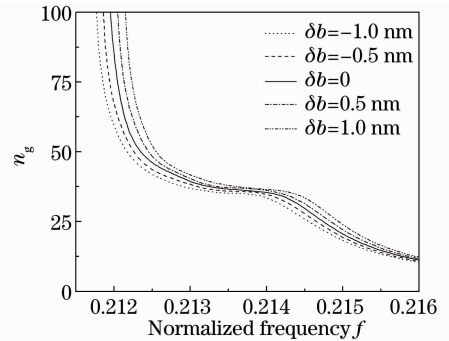


图 6 参数 b 的加工误差对 n_g 和 f 曲线的影响 ($n_g = 36.5$)

Fig. 6 n_g as a function of normalized frequency f with fabrication errors relative to parameter b when $n_g = 36.5$ as listed in Table 1

4 结 论

采用圆弓形构建光子晶体线缺陷波导,通过调整长轴和短轴的大小、角度偏转等因素,可以减低向后散射和漫散射的影响,在色散较低情况下,获得较高的慢光群折射率,从而获得较低的群速度,实现慢

光波导结构的优化。这一研究的一般意义在于,如同改变周期性排列一样,通过选用新的散射元和调整其参数,也可以获得低色散、宽平带的慢光效应。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 T. Baba. Slow light in photonic crystals[J]. *Nat. Photon.*, 2008, **2**: 465~473
- 3 T. F. Krauss. Slow light in photonic crystal waveguides[J]. *J. Phys. D*, 2007, **40**(9): 2666~2670
- 4 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
- 5 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
- 6 A. Y. Petrov, M. Eich. Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(21): 4866~4868
- 7 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
- 8 A. D. Falco, L. O'Faolain, T. F. Krauss. Dispersion control and slow light in slotted photonic crystal waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(8): 083501
- 9 B. Wang, M. A. Dünder, R. Nötzel *et al.*. Photonic crystal slot nanobeam slow light waveguides for refractive index sensing[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(15): 151105
- 10 S. Kubo, D. Mori, T. Baba. Low-group-velocity and low-dispersion slow light in photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(20): 2981~2983
- 11 L. H. Frandsen, A. V. Lavrinenko, J. F. Pefersen *et al.*. Photonic crystal waveguides with semi-slow light and tailored dispersion properties [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9444~9450
- 12 C. Li, H. Tian, C. Zheng *et al.*. Improved line defect structures for slow light transmission in photonic crystal waveguide[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **279**(4): 214~218
- 13 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, 潘伟, 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
- 14 N. Ozaki, Y. Kitagawa, Y. Takata. High transmission recovery of slow light in a photonic crystal waveguide using a hetero group velocity waveguide[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 7974~7483
- 15 T. P. White, L. C. Botten, C. M. Sterke *et al.*. Efficient slow-light coupling in a photonic crystal waveguide without transition region[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(22): 2644~2646
- 16 Zhang Wei, Wang Zhiyong, Wang Wenchao *et al.*. Investigation on a novel photonic crystal structure with dispersion-free slow light based on line-defect of quadrate air holes[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1006006
张伟, 王智勇, 王文超等. 基于方形孔线缺陷的新型光子晶体零色散慢光结构研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1006006
- 17 J. T. 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
- 18 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): 5707~5712
- 19 J. Wu, Y. P. Li, C. Peng *et al.*. Wideband and low dispersion slow light in slotted photonic crystal waveguide [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(14): 2815~2819
- 20 M. E. Heidari, C. Grillet, C. Monat *et al.*. Dispersion engineering of slow light photonic crystal waveguides using microfluidic infiltration [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(3): 1628~1635
- 21 Y. Hamachi, S. Kubo, T. Baba. Slow light with low dispersion and nonlinear enhancement in a lattice-shifted photonic crystal waveguide[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 1072~1074
- 22 J. Wu, Y. P. Li, C. Peng *et al.*. Numerical demonstration of slow light tuning in slotted photonic crystal waveguide using microfluidic infiltration [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(8): 2149~2152
- 23 T. Baba, T. Kawasaki, H. Sasaki *et al.*. Large delay-bandwidth product and tuning of slow light pulse in photonic crystal coupled waveguide[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(12): 9245~9253
- 24 S. C. Huang, M. Kato, E. Kuramochi *et al.*. Time-domain and spectral-domain investigation of inflection-point slow-light modes in photonic crystal coupled waveguide[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 3543~3549
- 25 H. Tian, F. Long, W. Liu *et al.*. Tunable slow light and buffer capability in photonic crystal coupled-cavity waveguides based on electro-optic effect [J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(10-11): 2760~2764
- 26 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
- 27 K. Tian, W. Arora, S. Takahashi *et al.*. Dynamic group velocity control in a mechanically tunable photonic-crystal coupled-resonator optical waveguide [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **80**(13): 134305
- 28 G. Manzacca, H. Habibiyan, K. Hinger *et al.*. Coupled cavity polaritons for switching and slow light applications [J]. *Nanostructures*, 2009, **7**(1): 39~46
- 29 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): 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
- 30 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
- 31 X. Chen, P. Shum, J. Hu. Special control of the cutoff frequencies in a 2D photonic crystal coupled-cavity waveguide[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **276**(11): 93~96
- 32 K. Üstün, H. Kurt. Ultra slow light achievement in photonic crystals by merging coupled cavities with waveguides[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(20): 21155~21161
- 33 S. Kocaman, X. Yang, J. F. McMillan *et al.*. Observations of temporal group delays in slow-light multiple coupled photonic crystal cavities[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(22): 221111
- 34 V. S. C. Manga Rao, S. Hughes. Single quantum dots for slow and fast light in a planar photonic crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(3): 304~307
- 35 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

36 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大赫兹波导的制备与表征[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1222004
 37 Y. Wan, Z. 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
 38 A. Têtu, M. Kristensen, L. H. Frandsen *et al.*. Sigmund broadband topology-optimized photonic crystal components for both TE and TM polarizations[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(21): 8606~8611

栏目编辑: 王晓琰

2.79 μm 窄脉冲、高峰值功率电光调 Q Cr,Er:YSGG 激光器

2.79 μm 激光在医疗、军事等领域有着重要的应用。窄脉冲高峰值功率且易被组织强吸收的钇激光,为病变组织相互作用机理的研究提供了一种理想的光源,可利用其对眼角膜、牙齿和骨骼等组织进行精准的切削或消融,皮肤皱纹祛除、色素爆破等动力学过程进行研究,其能有效减小对周围组织的热损伤。此外,该波长的激光在科研领域中也有着重要的应用,它是光学参量振荡器的理想抽运源,可用此获得 3~12 μm 的中红外激光,在有机污染物与毒气检测、光电对抗等领域有着十分重要的用途。

目前,能用于 2.79 μm 波长的电光晶体仅 LiNbO₃ 晶体,但其低的损伤阈值、较大的介电常数限制了脉宽的压缩和峰值功率的提高,一般该波段的电光调 Q 激光脉冲宽度在百纳秒量级,峰值功率小于 1 MW。本课题组采用具有高损伤阈值的 LGS 晶体制作了 2.79 μm 波长的电光 Q 开关,开展了激光实验,不仅首次证明了 LGS 晶体可以应用于 2.79 μm 波段的电光调 Q,而且获得了高峰值功率的窄脉冲输出,激光脉冲宽度和峰值功率都创下该波段的最好数值。

激光实验结果如图 1 所示,随着抽运能量的增加,脉冲能量增大,由于受腔镜介质膜损伤阈值的限制,能量没有继续增加。实验中采用氙灯抽运 Cr,Er:YSGG,用 15 $^{\circ}\text{C}$ 去离子水冷却,在抽运能量

为 73 J,频率为 3 Hz 时获得了 86 mJ,20 ns 的激光输出,峰值功率达到 4.3 MW。最大输出能量时的脉冲波形如图 2 所示。

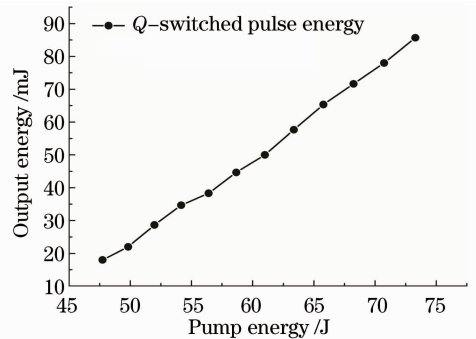


图 1 输出能量随抽运能量变化曲线

Fig. 1 Output energy as a function of the pump energy

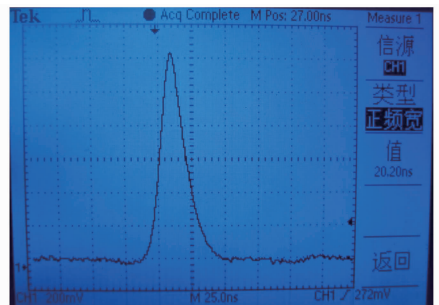


图 2 激光器输出脉冲波形

Fig. 2 Pulse profile of the laser

王 礼¹ 杨经纬¹ 吴先友^{1,2} 孙敦陆¹ 殷绍唐¹ 江海河^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所,安徽 合肥 230031
²中国科学院合肥物质科学研究院医学物理与技术中心,安徽 合肥 230031

* E-mail: hjiang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2012-11-05; 收到修改稿日期: 2012-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61275118)、国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(U1230131)和中国科学院知识创新工程重点方向项目(KJCX2-EW-NO7)资助课题。