

doi: 10.3788/gzxb20164502.0223002

矩形孔光子晶体波导慢光特性

毛强明, 李长红, 夏铮

(青岛大学 自动化工程学院, 山东 青岛 266071)

摘要:在线缺陷光子晶体波导中,利用矩形孔和椭圆孔分别替代临近线缺陷的第二行和第一、三行圆形孔,构成矩形孔光子晶体波导结构.利用平面波展开法对波导的慢光特性进行仿真分析,研究矩形孔的非对称性对慢光带宽和色散特性的影响.研究表明,在慢光区域平均群折射率变化为 $\pm 10\%$ 的情况下,与圆形孔线缺陷波导相比,得到的导模能更好地限制在禁带中,而且当矩形孔宽度参量小于高度参量时,导模可以得到归一化延迟带宽积更大、带宽更宽、色散更小的慢光.通过对波导中矩形孔参量的优化,得到的慢光归一化延迟带宽积最大为 0.402,此时带宽为 44.4 nm,群速度色散为 8.0 ps²/mm.

关键词:光通信;光子晶体;波导;慢光;色散;带宽

中图分类号:TN252;O433

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)02-0223002-6

Investigation on Slow Light Properties in Rectangular Holes Photonic Crystal Waveguide

MAO Qiang-ming, LI Chang-hong, XIA Zheng

(College of Automation Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: Rectangular holes photonic crystal waveguide was proposed, by introducing rectangular holes in the second row and ellipse holes in the first and third rows near the line-defect waveguide to replace circle holes. The characteristics of slow light were investigated by plane wave expansion method. Influence of the structure asymmetry of rectangular holes to slow light bandwidth and low dispersion property were studied. Results show that within the linear region of guided mode that average group index varies at a variation of $\pm 10\%$ range, compared to circular holes line-defect waveguide, the obtained guided mode can be better restricted in band gap, when width parameter of rectangular holes is smaller than height parameter, guided mode can obtain slow light with bigger normalized delay-bandwidth product, wider bandwidth and lower dispersion. Optimization to parameters of rectangular holes in the waveguide shows the biggest normalized delay-bandwidth product about 0.402, with bandwidth about 44.4 nm and group velocity dispersion about 8.0 ps²/mm, it indicates that the waveguide has a promising application in the field of data transmission without distortion.

Key words: Optical communication; Photonic crystal; Waveguide; Slow light; Dispersion; Bandwidth

OCIS Codes: 230.7370; 230.5298; 260.2030

0 引言

近年来,慢光由于在全光缓存^[1]、光逻辑^[2]、滤波器、光存储^[3]、光调制器等光信息处理方面^[4]的应用价值,成为光学领域的研究热点.光子晶体作为一种新型的人工材料,具有体积小、工作波长尺寸小、易实现单片集成、可以在室温下运行、能够通过结构的灵活设计

对慢光进行人为控制等优势,因此光子晶体成为承载慢光的重要方式和手段.

光子晶体中引入缺陷可以形成波导,光子晶体波导结构主要有线缺陷波导^[5]和耦合腔波导^[6].对于光子晶体波导,理论上可以实现群速度为 0 的慢光,Zhao Yong^[7]通过对椭圆形空气孔沟槽型光子晶体波导进行研究,获得群折射率为 215.5,群速度色散最小为 1.8

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos. 61307050,11144007)和山东省自然科学基金项目(No. BS2012CL012)资助

第一作者:毛强明(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为光子晶体波导慢光. Email: sdaq_mqm@126.com

导师(通讯作者):李长红(1973-),女,副教授,博士,主要研究方向为光子晶体以及慢光特性、宽带光纤通信系统. Email: jiluch@126.com

收稿日期:2015-09-21;录用日期:2015-12-10

<http://www.photon.ac.cn>

ps^2/mm 的慢光,但缺点是慢光带宽太窄,为 1.02 nm ; Tang Jian 等^[8]通过移动光子晶体波导临近线缺陷的前三行空气孔得到的群折射率最大为 132、带宽为 19.1 nm 、群速度色散最小为 $123.4 \text{ ps}^2/\text{mm}$ 的慢光,但归一化延迟带宽积仅为 0.35; Meng Bo 等^[9]通过调节新月形空气孔光子晶体波导临近线缺陷的两行孔倾斜角度,在归一化延迟带宽积为 0.45 的情况下,获得群折射率分别为 23、35 和 45,带宽分别为 40.7 、 23.7 和 5.1 nm 的慢光,但缺点是新月形光子晶体设计复杂,不易制作. 目前对光子晶体线缺陷波导的研究,主要为二维三角晶格圆形空气孔平板线缺陷波导结构,大多数研究采用改变圆形空气孔的半径和位置^[10],引入环形孔^[11-12]、椭圆孔、眼形孔^[13],改变线缺陷的宽度等方法,来改善波导中导模的色散特性.

本文以二维三角晶格空气孔光子晶体波导为基础,将矩形空气孔替代临近线缺陷的第二行圆形空气孔,并将椭圆孔替代临近线缺陷的第一、三行圆形空气孔,得到设计的波导结构. 利用平面波展开法对不同矩形空气孔结构参量下慢光的群折射率、带宽和群速度色散进行理论分析. 结果表明,导模可以很好地限制在波导中,损耗减小,获得较宽的带宽和较小的色散,并且当矩形孔宽度小于高度时,获得归一化延迟带宽积最大为 0.402,群折射率为 22.2,带宽为 44.4 nm ,群速度色散为 $8.0 \text{ ps}^2/\text{mm}$.

1 数值模拟

本文研究的线缺陷矩形空气孔光子晶体波导结构如图 1,在硅片上的二维三角晶格空气孔光子晶体中引入线缺陷,将矩形空气孔替代临近波导中心的第二行圆形空气孔,并将椭圆孔替代临近线缺陷的第一、三行空气孔.

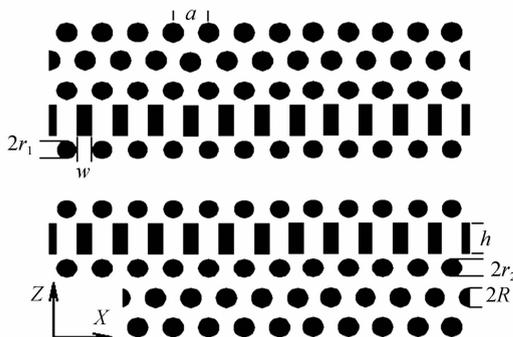


图 1 光子晶体波导结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photonic crystal waveguide structure

图 1 中,硅折射率取 3.46,工作波长取 1550 nm ,晶格常量 a 取 600 nm ,圆形孔的半径 R 取 $0.3a$,硅板的厚度为 270 nm . w 和 h 分别为矩形空气孔的宽度和高度, r_1 和 r_2 为椭圆孔短轴半径且 $r_1 = r_2 = 0.23a$,椭

圆孔长轴半径为 $0.3a$. 通过三维平面波展开法计算光子晶体波导的色散非常耗时,而二维方法计算波导的慢光特性准确且省时,因此本文采用二维平面波展开法研究波导色散特性. 波导所求的色散曲线是在 TE 模式下得到的,其中超晶胞结构由一行十列的空气孔组成.

为了表示波导中慢光的传播速度,引入群折射率 n_g 为

$$n_g = \frac{c}{v_g} = c \cdot \frac{dk}{d\omega} = \frac{dK}{dU} \quad (1)$$

n_g 为慢光群折射率, v_g 为群速度, k 为沿波导方向的波矢量^[14], ω 为入射光的中心角频率, $K = ka/2\pi$ 为归一化波矢量, $U = \omega a/2\pi c$ 为归一化频率. 群折射率 n_g 表示波导中光信号的传播速度, n_g 越大,波导减慢光信号速度的能力越强.

波导中 h 和 w 参量单独变化时,得到的色散曲线如图 2,其中实线 $R = 0.3a$ 表示圆形孔散射元波导产生的导模.

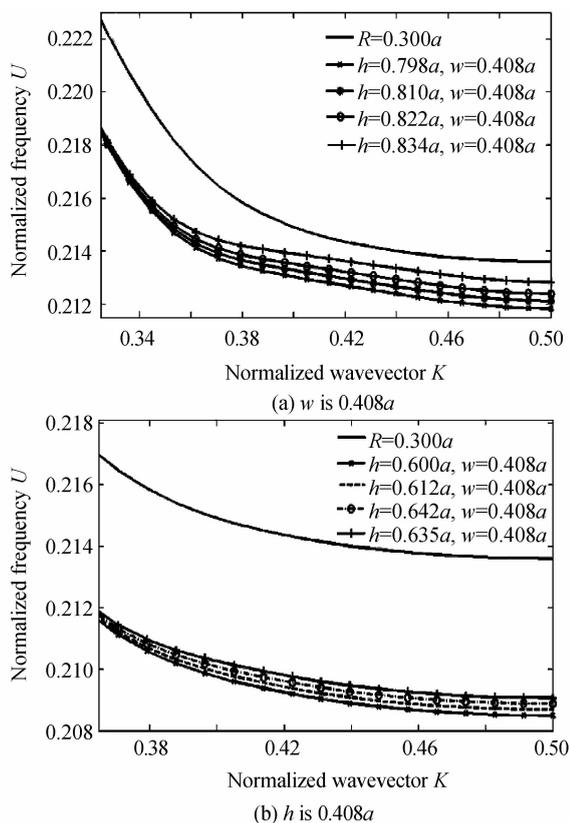


图 2 U 与 K 关系曲线

Fig. 2 The relationship of U with K

由文献[5]可知,导模由折射率导模和禁带导模组成. 在图 2(a)中,当 K 在 $0.30 \sim 0.33$ 范围内时色散曲线呈线性,为群折射率导模区域,光能量被限制在波导的中心,而 K 在 $0.45 \sim 0.5$ 范围内时色散曲线也呈线性,为禁带导模区域,光能量主要集中于波导中心向前传播,部分光能量进入线缺陷两侧第一行和第二行空

气孔并且衰减迅速,这两个线性部分的延伸线相交点为反交叉点.在反向交叉点波导群速度变化最快,并且反交叉点至第一布里渊区边界为慢光区域.由图 2(a)可以看出,当矩形孔高度 h 不变而宽度增加时,相对于圆形孔散射元产生的导模,矩形波导各导模都位于其下方,折射率导模斜率略小,反向交叉点所在波矢也较小,这说明加入矩形孔的波导工作波长较大,导模慢光区域范围较大,而禁带导模在 K 为 $0.37\sim 0.48$ 范围内斜率较小,意味着慢光群折射率较大,能更好地减慢光速.对于所研究的四条导模,比较发现反交叉点随着 w 增大稍向左移,慢光区域频率上移,禁带导模斜率略有减小,可见各导模慢光区域基本一致,群折射率略有增加.同理,在图 2(b)中矩形孔高度不变,而宽度增加时,相对于圆形孔散射元产生的导模,波导所产生的各导模分布范围较紧密,所在频率范围比图 2(a)更小,反交叉点稍向左移.因此,为了获得好的慢光较大的群折射率, h 和 w 越大越好.然而,大量的仿真结果表明,矩形孔宽度 w 和高度 h 不能同时大于 $0.6a$,为了获取较大的慢光带宽和较小的群速度色散,调节矩形孔参量 w 和 h 讨论慢光群折射率、带宽和色散特性,得到 TE 模式下归一化频率 U 与归一化波矢 K 之间的关系,如图 3.

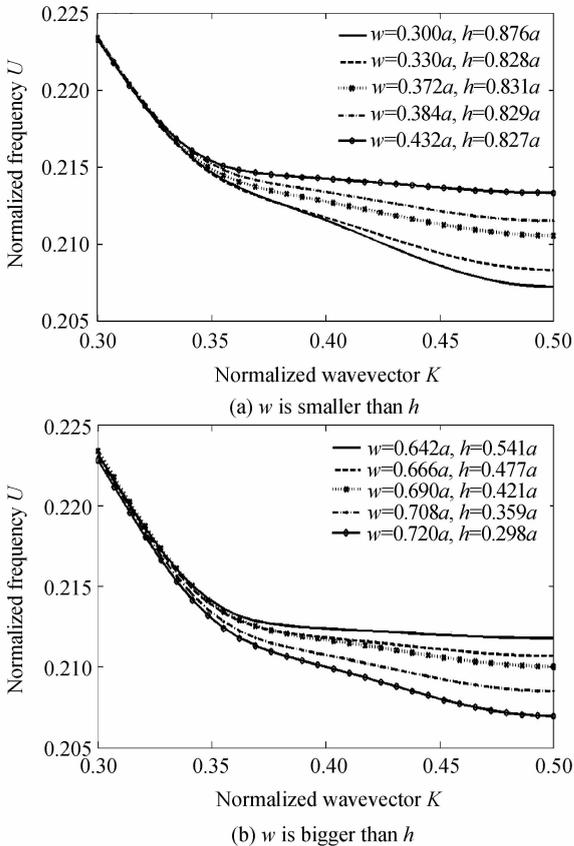


图 3 U 与 K 的关系

Fig. 3 The relationship of U with K

图 3(a)中,各导模曲线的反向交叉点几乎在同一

位置,慢光区域基本相同.在慢光区域内,随着宽度 w 增加和高度 h 减小,导模向高频方向移动,而导模的倾斜角度逐渐减小,说明各导模的群速度逐渐减小,群折射率逐渐增大,计算可得带宽分别为 65.3 nm 、 44.4 nm 、 27.9 nm 、 23.2 nm 和 16.1 nm .图 3(b)中,随着宽度 w 增加和高度 h 减小,各导模的反交叉点向低频波矢方向移动,导模的慢光区域逐渐增大.在不同的慢光区域内,各导模向低频方向移动,导模斜率逐渐增大,这说明导模的群速度逐渐增大,群折射率逐渐减小,计算可得导模带宽分别为 5.9 nm 、 12.2 nm 、 19.6 nm 、 29.2 nm 和 37.6 nm .

对图 3 的导模曲线求解一阶导数可得 n_g 与 U 之间的关系图,如图 4.

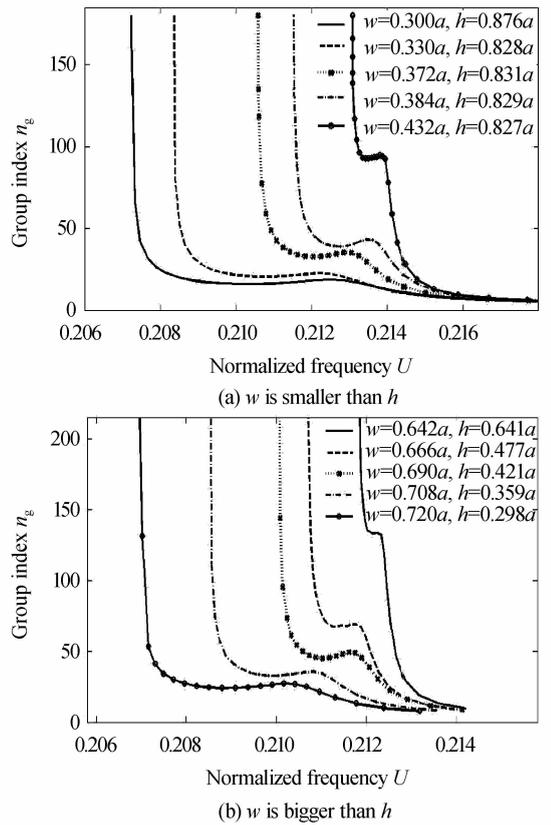


图 4 n_g 与 U 的关系

Fig. 4 The relationship of n_g with U

图 4(a)对应于图 3(a),导模得到的群折射率 n_g 分别为 17.3 、 22.2 、 34.3 、 42.2 和 93.2 .图 4(b)对应于图 3(b),当矩形孔宽度 w 分别为 $0.720a$ 、 $0.708a$ 、 $0.690a$ 、 $0.666a$ 和 $0.642a$,高度 h 分别为 $0.298a$ 、 $0.359a$ 、 $0.421a$ 、 $0.636a$ 和 $0.541a$ 时,导模得到的群折射率 n_g 分别为 25.3 、 34.5 、 47.1 、 68.1 和 133.4 .

由数据可以看出,在 w 小于 h 的情况下,当 w 较小而 h 较大时,导模的慢光区域带宽较宽、平缓且位于低频区域,而群折射率较小,同样,在 w 大于高度 h 的情况下,当 w 较大而 h 较小时,结果相同.

2 分析与讨论

Li Ji-guang 等^[15] 研究证明椭圆形晶胞结构改变了三角晶格周期对称性,同时减小了能量在波导中传输的损耗.本文所研究的波导结构利用矩形孔和椭圆孔分别替代临近线缺陷的第二行和第一、三行空气孔,实际也改变了光子晶体波导的周期对称性.在光子晶体波导中,导模距离禁带边界越远,能量向外辐射越小,波导传输效率也就越高.椭圆空气孔可以减小波导中能量的损耗,为了研究矩形孔对波导慢光的影响,将矩形孔晶胞结构、包含矩形孔的圆形晶胞结构和同时包含矩形孔和椭圆孔晶胞结构的线缺陷波导能带曲线进行比较,如图 5.

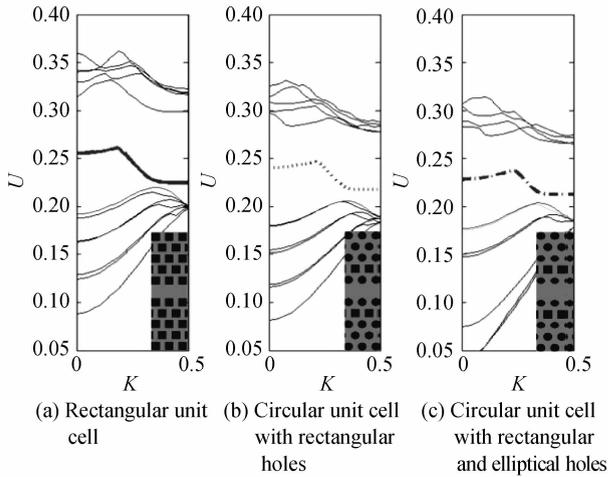


图 5 能带曲线
Fig. 5 Band diagrams

图 5 为二维三角晶格线缺陷光子晶体波导不同晶胞结构的能带曲线,中间曲线为导模,导模两侧空白区域为禁带.通过比较,发现图 5(b)中导模与禁带边界距离比图 5(a)更远,而且禁带宽度基本不变,禁带和导模向低频方向移动.图 5(c)波导结构是在图 5(b)的基础上引入两行椭圆孔,明显看出,导模仍然与禁带边界保持较远距离,而且禁带和导模进一步向低频方向移动.这表明圆形孔线缺陷波导中引入矩形孔和椭圆孔,导模能更好地限制在禁带中,波导传输效率较高,而且导模所在频率较低.

线缺陷光子晶体波导的导模由折射率导模和禁带导模组成,这两种导模的反向交叉点决定了导模色散曲线的局部形状,而距离线缺陷波导最近的两行空气孔可以改变反向交叉点的位置.本文工作原理就是在椭圆孔参量不变,仅改变矩形孔尺寸的情况下,通过改变反向交叉点的位置以改变两种导模的内部相互作用,来调节色散曲线的弯曲变化,进而获得导模平带慢光区域,实现宽带和低色散慢光传输.

折射率导模和禁带导模传播模式相反,产生了光子晶体禁带结构,折射率导模位于导模低波矢区域,禁

带导模位于导模高波矢区域.光子晶体波导参量的变化导致导模较宽的带宽和高的群折射率难以同时存在,导模平缓,则带宽较大,而导模接近线性状态,则色散较小,综合以上考虑,引入归一化延迟带宽积(Normalized Delay-bandwidth Product, NDBP)^[16]的概念,即

$$\text{NDBP} = \bar{n}_g \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad (2)$$

\bar{n}_g 表示慢光平均群折射率, $\Delta\lambda$ 和 λ_0 分别为慢光的宽度和中心频率. NDBP 为慢光平均群折射率与归一化带宽的乘积, NDBP 越大时,带宽越大,色散越小,这有利于慢光特性的研究,因此, NDBP 是评价慢光特性的一个重要参量.

光子晶体波导获得慢光的同时伴随着群速度色散(Group Velocity Dispersion, GVD),色散对慢光有很大影响,因此定义 GVD 的二阶色散系数参量 β_2 为

$$\beta_2 = \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} = \frac{1}{c} \frac{\partial n_g}{\partial U} = \frac{a}{2\pi c^2} \frac{\partial^2 K}{\partial U^2} \quad (3)$$

参量 β_2 描述了群速度色散的程度,是引起信号失真的主要因素,因此应降低导模群速度色散.为了更容易比较图 4 中两种情况下群速度色散 β_2 与归一化频率 U 的关系,将数据绘制如图 6.

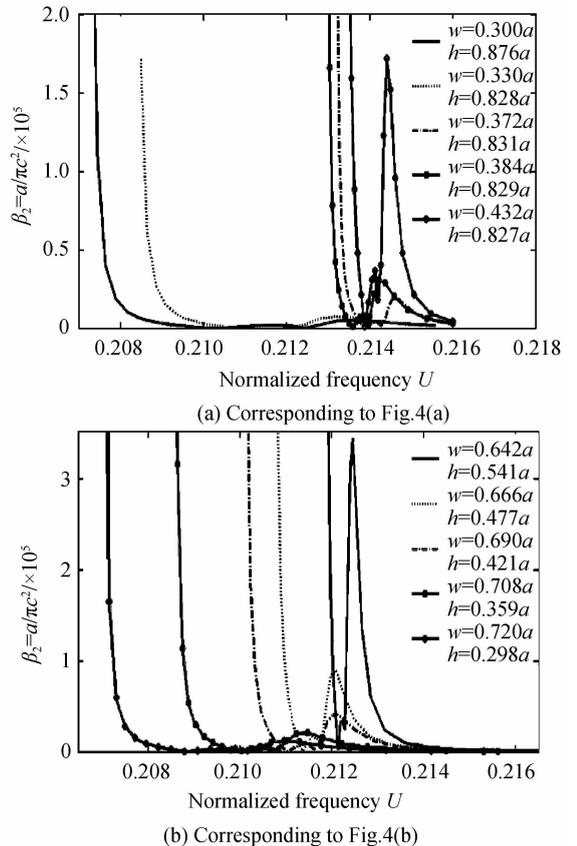


图 6 参量 β_2 和 U 的关系图

Fig. 6 The relationship of β_2 with U

图 6(a)中,当矩形孔宽度 w 为 $0.330a$,高度 h 为

0.828a 时,群速度色散 β_2 为 8.0 ps²/mm,此时群折射率为 22.2,当群折射率为 42.2 时, β_2 为 32.7 ps²/mm,此时宽度为 0.384a,高度 h 为 0.829a.图 6(b)中,当矩形孔宽度 w 为 0.708a,高度 h 为 0.359a 时,群折射率为 34.5, β_2 为 21.2 ps²/mm,当矩形孔宽度 w 为 0.690a,高度 h 为 0.421a 时,群折射率为 47.1, β_2 为 44.5 ps²/mm.明显看出,导模在慢光区域群折射率数值较小时,色散曲线起伏较小,导模带宽较宽,色散对信号的传输影响较小,随着群折射率的增大,色散曲线变陡峭,带宽减小,色散容易引起信号形变,发生失真.

为评估导模群折射率、带宽和色散的慢光特性,可将平均群折射率变化 $\pm 10\%$ 作为慢光低色散区域,并以 NDBP 作为衡量导模慢光特性的依据.为了更清楚地比较在矩形孔宽度 w 小于高度 h 和宽度 w 大于高度 h 两种情况下导模的慢光特性,将群折射率 n_g 、慢光线性区域带宽 $\Delta\lambda$ 与 NDBP 的数值整理得到表 1 和表 2.光子晶体波导中矩形孔两侧的椭圆孔短轴半径 r_1 和 r_2 为常量 0.23a,表中将不再列出.

表 1 图 3(a)对应的慢光参量

Table 1 Slow light parameters for the structure in Fig. 3(a)

w/a	h/a	n_g	$\Delta\lambda/\text{nm}$	NDBP
0.300	0.876	17.3	65.3	0.397
0.330	0.828	22.2	44.4	0.402
0.372	0.831	34.3	27.9	0.360
0.384	0.829	42.2	23.2	0.387
0.432	0.827	93.2	16.1	0.361

表 2 图 3(b)对应的慢光参量

Table 2 Slow light parameters for the structure in Fig. 3(b)

w/a	h/a	n_g	$\Delta\lambda/\text{nm}$	NDBP
0.720	0.298	25.3	37.6	0.319
0.708	0.359	34.5	29.2	0.353
0.690	0.421	47.1	19.6	0.325
0.666	0.477	68.1	12.2	0.293
0.642	0.541	133.4	5.9	0.277

从表 1 可以看出,NDBP 最大为 0.402,此时矩形宽度 w 为 0.330a,高度 h 为 0.828a,相应的群折射率 n_g 为 22.2,带宽为 44.4 nm,而当矩形宽度 w 为 0.384a,高度 h 为 0.829a 时,得到的 NDBP 为 0.387,群折射率为 42.2,带宽为 23.2 nm,优于文献[17]得到的 NDBP 最大为 0.345,此时群折射率为 32,带宽为 16.92 nm.表 2 中,NDBP 最大为 0.353,此时 w 为 0.708a, h 为 0.359a,导模得到的群折射率为 34.5,带宽为 29.2 nm,随着群折射率的增大,带宽逐渐减小,NDBP 也逐渐减小,当群折射率为 133.4 时,带宽仅为 5.9 nm,NDBP 为 0.277.通过对两个表中数据比较发现,当矩形孔的宽度 w 小于高度 h 时,导模得到的 NDBP 较大,且带宽较宽,当群折射率达到 93.2 时,带宽仍能达到 16.1 nm,数据优于文献[18]当群折射率

为 83 时,带宽为 3.7 nm.

由表 1、2 可以看出,当矩形孔参量 w 小于 h 时,光子晶体波导能获得较好的慢光效果.这是因为,在光子晶体波导中引入的矩形空气孔存在空间结构的非对称性,改变了波导的传输效率.在图 1 中, X 轴和 Z 轴构成的平面内,矩形孔除了沿 X 轴方向和 Z 轴方向是对称的以外,其他任何方向都不对称.如表 1 中所示, h 在 0.82a~0.88a 范围内变化,而波导中沿着 Z 轴方向两行空气孔的距离为 0.866a,矩形孔已经与临近的第一、三行椭圆孔十分接近. w 在 0.3a~0.43a 范围内变化,明显小于 h ,这实际上相当于在线缺陷两侧第二行空气孔位置添加了很多微腔,而光脉冲在耦合腔波导中的传播是基于微腔之间的耦合效应,通过合理地调节矩形微腔的宽带和相互间的距离,耦合作用会加强,有利于慢光传输.表 2 中,矩形孔 w 较大,而 h 很小,矩形微腔之间的耦合作用减小,波导传输效率降低,不利于慢光传输.可以看出,在慢光区域,随着 w 的增大,参量 h 逐渐减小,以保证导模为线性;导模频率向频率增大的方向移动,导模得到的群折射率逐渐增大,带宽逐渐减小;归一化延迟带宽积有起伏波动,但仍高于 w 大于 h 时的数据结果.数据说明,当参量 w 小于 h 时, w 取定值,以 NDBP 值最大时的 h 为中心,随着 h 的增大,慢光区域各导模向频率增大的方向移动,导模带宽基本不变,获得的平均群折射率逐渐增大;归一化延迟带宽积先增大后减小;群速度色散随群折射率的增大逐渐增大.

3 结论

分析了二维三角晶格线缺陷光子晶体波导中引入的矩形孔和椭圆孔对波导慢光传输特性的影响.结果表明,引入两种空气孔可以将导模较好地限制在禁带中,减少波导中光脉冲的损耗,并且由于矩形孔存在空间的各向异性,当矩形孔高度大于宽度时,光子晶体波导能获得较好的慢光效果.计算可得在慢光线性区域内导模的 NDBP 最大为 0.402,带宽最大为 65.3 nm,群速度色散最小为 8.0 ps²/mm.光子晶体波导得到的慢光带宽较宽,色散较小,可以增加数据传输效率并减小信号失真,为数据高质量传输提供了借鉴.

参考文献

- [1] JAGERSKA J, THOMAS N L, ZABELIN V, *et al.* Experimental observation of slow mode dispersion in photonic crystal couple-cavity waveguide[J]. *Optics Letters*, 2009, **34** (3): 359-361.
- [2] LI Chang-hong, WAN Yong, MAO Qiang-ming. Research of slow light performances of photonic crystal coupled resonator optical waveguides formed by oval rods cavities [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **4**(35): 252-259.
李长红, 万勇, 毛强明. 圆柱微腔光子晶体耦合腔波导的慢光特性研究[J]. *光学学报*, 2015, **4**(35): 252-259.
- [3] SHI Jun, LIU Yong-ke, LIU Xu-biao, *et al.* A new-type two-

- dimensional photonic crystal[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2008, **37**(5): 940-943.
- 史军, 刘勇科, 林旭彪, 等. 一种衍生于三角晶格的二维光子晶体[J]. 光子学报, 2008, **37**(5): 940-943.
- [4] DONG Xiao-wei, QUAN Wei, LIU Wen-kai. Investigation on slow light in photonic crystal coupled-cavity waveguide[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2015, **44**(2): 02230011.
- 董小伟, 权伟, 刘文楷. 耦合腔光子晶体慢光波导结构[J]. 光子学报, 2015, **44**(2): 02230011.
- [5] WANG Dong-lin, YU Zhong-yuan, LIU Yu-min. Optimization of a two-dimensional photonic crystal waveguide for ultraslow light propagation[J]. *Journal of Optics*, 2012, **14**(12): 1251011.
- [6] LI Lei, LIU Gui-qiang, CHEN Yuan-hao, *et al.* Photonic crystal three-wavelength power splitter based on directional coupling[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2013, **42**(2): 167-170.
- 黎磊, 刘桂强, 陈元浩, 等. 光子晶体定向耦合三波长功分器[J]. 光子学报, 2013, **42**(2): 167-170.
- [7] ZHAO Yong, ZHANG Ya-nan, HU Hai-feng. Dispersion engineering of slow light in ellipse-shaped hole slotted photonic crystal waveguide[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(11): 2144-2150.
- [8] TANG Jian, WANG Tao, LI Xiao-ming, *et al.* Wideband and low dispersion slow light in lattice-shifted photonic crystal waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(19): 3188-3194.
- [9] MENG Bo, WANG Ling-ling, HUANG Wei-qing, *al et.* Wideband and low dispersion slow-light waveguide based on a photonic crystal with crescent-shaped air holes[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(23): 5735-5742.
- [10] LI Jun-tao, WHITE T P. Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(9): 6227-6232.
- [11] DAI Lei, JIANG Chun. Ultrawideband low dispersion slow light waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(14): 2862-2868.
- [12] JIANG Li-yong, WU Hong, LI Xiang-yin. Polarization-insensitive self-collimation and beam splitter based on triangular-lattice annular photonic crystals[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, **30**(5): 1248-1255.
- [13] WAN Yong, FU Kai, LI Chang-hong, *et al.* Improving slow light effect in photonic crystal line defect waveguide by using eye-shaped scatters[J]. *Optics Communications*, 2013, **286**(1): 192-196.
- [14] LU Shu-yuan, ZHAO Jian-lin, ZHANG Dong. Slow light transmission in two-dimension square photonic crystal waveguide[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2009, **38**(9): 2224-2228.
- 吕淑媛, 赵建林, 张栋. 二维正方光子晶体波导中的慢光传输[J]. 光子学报, 2009, **38**(9): 2224-2228.
- [15] LI Ji-guang, HUANG Z R. Low loss photonic crystal waveguide by elliptical unit cell structure[C]. Lasers & Electro-optics Society, Leos Meeting of IEEE, 2006, 827-828.
- [16] ZHU Kong-tao, DENG Tian-song, SUN Yan, *et al.* Slow light property in ring-shape-hole slotted photonic crystal waveguide[J]. *Optics Communications*, 2013, **290**(1): 87-91.
- [17] ZHANG Ya-nan, ZHAO Yong, LI Jin. Theoretical research on slow light engineering of slotted photonic crystal waveguides with elliptical holes and optofluidic infiltration[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(7): 1639-1646.
- [18] LONG Fang, TIAN Hui-ping, JI Yue-feng. A study of dynamic modulation and buffer capability in low dispersion photonic crystal waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(8): 1139-1143.