

空气环型散射元光子晶体慢光特性研究

刘文楷¹ 邓建收² 董小伟²

¹北方工业大学计算机学院, 北京 100144

²北方工业大学电子信息工程学院, 北京 100144

摘要 以三角晶格空气环光子晶体线波导结构为研究对象,分析了空气环散射元内半径 R_{in} 和外半径 R_{out} 对波导慢光特性的影响,结果表明 R_{in}/R_{out} 的值在0.15~0.35之间时,能够获得宽带慢光,而且邻近波导两侧首排空气环的外半径 R_{out} 相对于其内半径 R_{in} 对慢光特性的影响更大。当波导两侧首排散射元为空气孔时有利于慢光群速度的降低、为空气环时有利于获得更宽的带宽。当波导两侧首排散射元由空气孔和空气环交替排布构成新型非对称线缺陷波导结构,同时具有了两类散射元的优点,它的群速度与带宽特性优于对称型波导,实现了群速度为0.0086 c 、波长范围为6.588 nm的低色散慢光。

关键词 集成光学; 光子晶体波导; 慢光; 带宽; 群速度; 归一化延时带宽积

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0106004

Investigation on Slow Light in Photonic Crystal with Air Ring

Liu Wenkai¹ Deng Jianshou² Dong Xiaowei²

¹College of Computer Science, North China University of Technology, Beijing 100144, China

²College of Electronic and Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China

Abstract The line defect waveguide structure of triangular lattice photonic crystal with air ring is studied. The influence of scatter inner radius R_{in} and outer radius R_{out} on the slow light properties is studied. These results indicate that the ratio of R_{in}/R_{out} in 0.15~0.35 is favorite to obtain the broadband slow light. The outer radius R_{out} of the air ring rows next to the waveguide channel has the more impact on the properties than the inner radius R_{in} of the air ring rows next to the waveguide channel. The air holes scattering element on both sides of the waveguide are benefit to reduce the group velocity, while the air rings are helpful to get wider slow light bandwidth. However, the ideal slow light phenomenon is obtained in the asymmetric line defect waveguide which is combined air holes with air rings. The group velocity 0.0086 c which has low dispersion is obtained with the wavelength range of 6.588 nm.

Key words integrated optics; photonic crystal waveguide; slow light; bandwidth; group velocity; normalized delay bandwidth product

OCIS codes 130.5296; 260.2030; 210.4810

1 引 言

慢光技术在光存储、光缓存、光信息处理方面具有广阔的应用前景^[1],已成为光通信领域的研究热点。光子晶体^[2]是由不同介电常数的材料在空间上呈周期性排列的人工微结构,其周期与光波长处于相同数量级,可以通过结构设计调制其光子态密度和色散曲线,例如:在光子晶体线缺陷波导^[3]的禁带中产生的平坦导模具有较小的群速度^[4-5],即光子晶体慢光。光子晶体慢光技术具有微小体积、室温运行、低损耗、高可控性等优点,使其在全光通信和光信号处理的应用中具有巨大潜力^[6]。

收稿日期: 2015-07-29; 收到修改稿日期: 2015-09-18

基金项目: 北京市自然科学基金(1144010)、北京市优秀人才培养项目(2013D005002000002)、北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划(CITQTC201304001)和北方工业大学科研人才提升计划(CCXZ201307)

作者简介: 刘文楷(1968—),男,博士,副教授,主要从事光子器件及集成技术方面的研究。E-mail: liuwk@ncut.edu.cn

已有的光子晶体慢光研究多集中于空气孔型或介质柱型光子晶体慢光^[7-10],在获得低群速的同时,带宽较窄,限制了实际应用。改变光子晶体结构来实现对光信号的调控已成为研究光子晶体慢光的新方向,如参考文献[11-14]就圆弓形散射元、月牙形散射元、空气环散射元光子晶体慢光特性进行了研究,这些新型散射元光子晶体表现出与空气环或介质柱光子晶体不同的特性或更优的慢光特性,例如万勇等^[13]通过调整圆弓形散射元参数实现了低色散的慢光。Saynatjoki等^[14]在空气孔中插入圆形介质柱形成空气环散射元二维光子晶体。刘会等^[15]对比研究了空气环型二维光子晶体与普通的空气孔型和介质柱型二维光子晶体的带隙特性,结果表明:空气环型光子晶体可以获得更宽的带隙。理论上,光子带隙越宽,光子晶体器件的性能越稳定^[16],因此分析空气环型光子晶体的慢光特性对光子器件的设计具有重要的指导意义。

为了获得慢光的同时降低色散甚至实现零色散,当前主要有两种方法:1)通过调整波导附近散射元的形状、尺寸、折射率和位置等获得宽带慢光^[17-18];2)利用啁啾结构的色散补偿特性获得宽带慢光^[19]。由于后者啁啾结构复杂,制备较为困难,目前主要采用第一种途径获得宽带低色散慢光。本文以空气环型光子晶体线缺陷波导为研究对象,设计出非对称型光子晶体波导,改善慢光带宽和群速度的综合特性。

2 结构设计与分析方法

三角晶格空气环光子晶体线缺陷波导结构如图1(a)所示:背景介质的折射率 $n=3.46$ (半导体Si或InP材料在近红外波段的折射率),空气的折射率取为1,晶格常数为 a ,空气环外半径 R_{out} 、空气环内半径 R_{in} 。在完整光子晶体中去除一排空气环散射元形成线缺陷波导,波导两侧结构相同,关于波导对称,称为对称线波导。如图1(b)所示:将波导两侧首排空气环部分退化为空气孔,使首排散射元由空气孔和空气环交替排布,在对称位置上的散射元类型不同,在波导方向上依然呈现出周期性,构成非对称线波导结构。

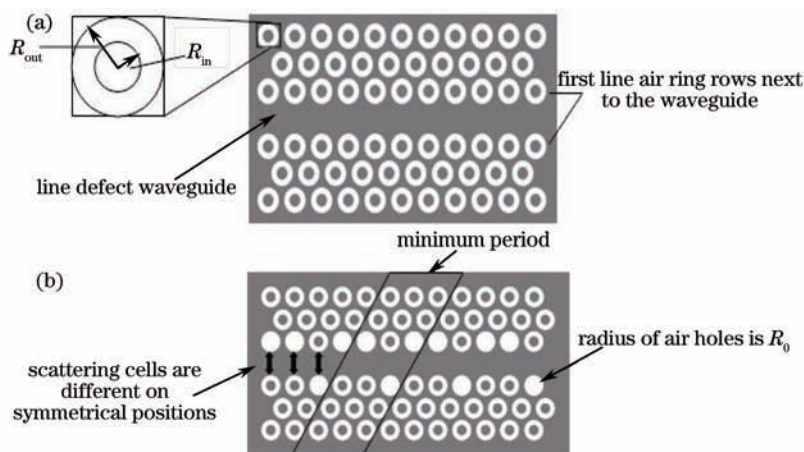


图1 空气环散射元线缺陷波导示意图。(a)对称型线缺陷波导示意图;(b)非对称型线缺陷波导示意图

Fig.1 Schematic diagram of line defect PC waveguide with air ring. (a) Schematic diagram of the symmetric line defect waveguide; (b) schematic diagram of the asymmetric line defect waveguide

能带分布是光子晶体波导慢光特性的重要指标,采用平面波展开法(PWE)求得空气环光子晶体对称线波导的TM模能带分布如图2所示:当 $R_{out}=0.47a$ 、 $R_{in}=0.15a$ 时^[15],光子晶体的禁带范围是0.2706~0.3285,在禁带中存在一条平坦导模,该导模上的光模式可以在线波导中传输。色散曲线在该区域的曲线斜率很小,基于色散关系 $v_g = d\omega/dk$ (ω 为角频率, k 为波矢)可求得导模的群速度 v_g 很小,即为慢光。

3 结构参数对慢光效应的影响

3.1 对称结构慢光特性分析

光子晶体线波导的色散调制模式主要分为折射率调制和带隙调制,能带曲线反映两种调制模式的结果。线波导结构参数影响色散模式,改变散射元的结构参数可以优化能带曲线,从而获得平坦慢光区域。首先分析空气环散射元内半径 R_{in} 与空气环外半径 R_{out} 的比值对慢光导模的影响。如图3所示:当 $R_{out}=0.47a$ 时, R_{in}/R_{out} 分别取0.4、0.35、0.25、0.15、0.1时的导模曲线, R_{in}/R_{out} 减小时,导模曲线逐渐上移,曲线愈平坦,当

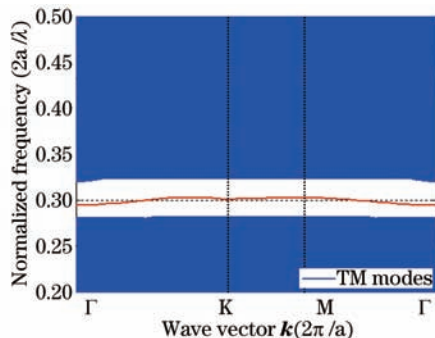


图2 当 $R_{out}=0.47 a$ 、 $R_{in}=0.15 a$ 时,能带(TM模)分布图

Fig.2 Relationship of the dispersion curves (TM mode) with $R_{out}=0.47 a$, $R_{in}=0.15 a$

$R_{in}/R_{out}<0.15$ 时,色散曲线位置几乎不再变化。根据色散关系式求得导模曲线的群速度曲线如图4所示:随着比值 R_{in}/R_{out} 的减小,群速度减小。结合图3和图4分析,当 $R_{in}/R_{out}>0.35$ 时,导模曲线明显弯曲,斜率较大,对应导模群速度较大,当 $R_{in}/R_{out}<0.15$ 时,其群速度和频带位置也几乎不变,因此当 $R_{in}/R_{out}=0.15\sim 0.35$ 时,慢光导模有较大带宽和较低群速度。

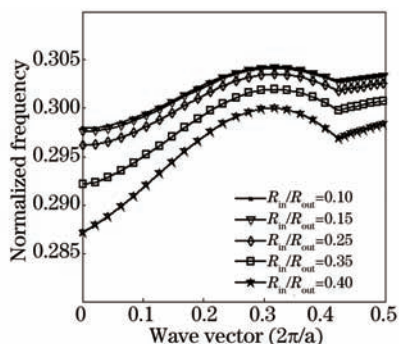


图3 色散特性曲线随 R_{in}/R_{out} 变化的关系

Fig.3 Relationship of the dispersion curves with the with change of R_{in}/R_{out}

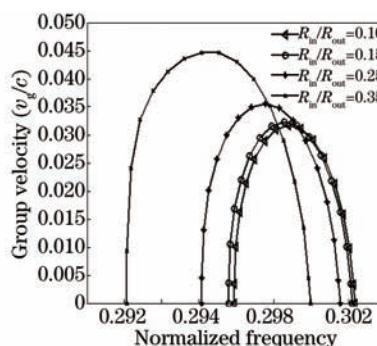


图4 群速度特性曲线随 R_{in}/R_{out} 的变化

Fig.4 Relationship of the group velocity curves the different parameters of R_{in}/R_{out}

距离波导越近的散射元对波导慢光特性影响越大,尤其是波导两侧首排空气环的结构参数直接影响波导慢光特性。优化计算得到 $R_{out}=0.45 a$ 、 $R_{in}=0.13 a$ ($R_{in}/R_{out}=0.289$) 时带隙较宽,分析波导两侧首排空气环的结构参数对慢光特性的影响,定义波导两侧首排空气环的内外半径分别为 R_{in} 和 R_{out} 。首先固定 $R_{out}=0.45 a$ 不变,分析 R_{in} 变化对波导慢光特性的影响如图5(a)所示:随着波导两侧首排空气环的内半径 R_{in} 的减小,对应导模的群速度减小,并向高频方向移动(蓝移)。其中 $R_{in}=0$ 时,空气环中的介质柱消失,空气环退化为空气孔。然后固定 R_{in} ,分析 R_{out} 对波导慢光特性的影响,分两种情况:1) $R_{in}=0$ 时,即波导两侧首排散射元均为空气孔时, R_{out} 减小对慢光特性的影响如图5(b)中浅灰色曲线所示;2) $R_{in}=0.17 a$ 时,线波导两侧首排散射元为空气环, R_{out} 减小对慢光特性的影响如图5(b)中深黑色曲线所示。对比两组曲线发现:随 R_{out} 的减小导模群速度均

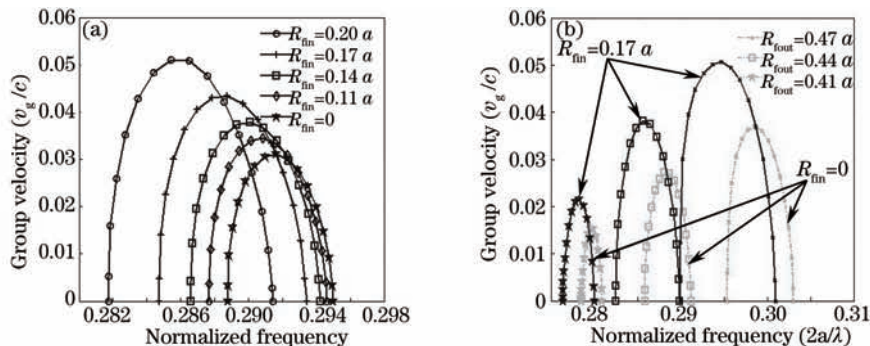


图5 群速度特性曲线随线波导两侧首排空气环结构参数的变化关系

Fig.5 Relationship of the group velocity curves with the size of the radius R_{in} or R_{out}

减小,且向低频方向移动(红移);两组曲线中 R_{out} 相等的曲线,均是浅灰色曲线的群速度较小,所占频率较高,此与图5(a)中反映的规律一致。由于 R_{in} 和 R_{out} 减小时慢光导模中心频率移动方向相反,通过减小 R_{in} 和 R_{out} 就可使慢光频率位于光通信领域的特定频率,不必调整晶格常数 a 的值。根据图5的分析的规律优化得到波导两侧首排空气环的 $R_{\text{out}}=0.415a$ 、 $R_{\text{in}}=0.17a$ 。

图5(b)说明波导两侧首排散射元为空气孔时有助于慢光群速度的降低、为空气环时有助于获得更宽的带宽,据此用空气孔有规律的替代波导两侧首排中的部分空气环,使空气孔和空气环交替排布,并保持在波导方向的周期性对光信号的调制作用,设计出如图1(b)的非对称结构,它能保持两种散射元各自的优点。

3.2 非对称结构慢光特性分析

非对称线波导结构如图1(b)所示,定义其中的空气孔的半径为 R_0 ,保持其他散射元结构参数不变,其中波导两侧空气孔半径 R_0 分别取 $0.29a$ 、 $0.3a$ 、 $0.325a$ 时,对应慢光导模的群速度曲线如图6所示, R_0 减小过程中,导模向低频移动,群速度减小。对比图5(b)与图6,图6中非对称波导结构的慢光群速度均小于 $0.13c$,比图5对称波导结构的最小群速度还小,这是因为光子晶体慢光是基于结构色散的,引入的线缺陷破坏了光子晶体的周期性,光信号在光子晶体内部产生布拉格散射效应,减缓了光信号的传输,得到慢光效应。本设计结合空气孔有利于慢光群速度的降低、空气环有利于获得更宽带宽的优点,波导两侧散射元类型不同进一步破坏光子晶体的周期性,获得更低群速度,结果证实了新结构结合了二者的优点。晶格缺陷导致导模边缘存在群速度色散(GVD)效应,较大的GVD会导致光脉冲的波前畸变,常用二阶群速度色散系数 $\beta_2 = \frac{d^2k}{d\omega^2} = \frac{dn_g}{d\omega} \cdot \frac{1}{c}$ 表征GVD,图7所示为非对称结构下 β_2 的曲线,曲线的平坦区域在 $-1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^6 \text{ ps}^2/\text{km}$ 之间,文献[20]指出:群速度色散值在 $-10^6 \sim 10^6 \text{ ps}^2/\text{km}$ 之间能满足在微小结构中正常传输的要求。另外,文献[19]利用色散补偿技术减弱群速度色散对传输的影响,因此该新型非对称波导能作为慢光结构。

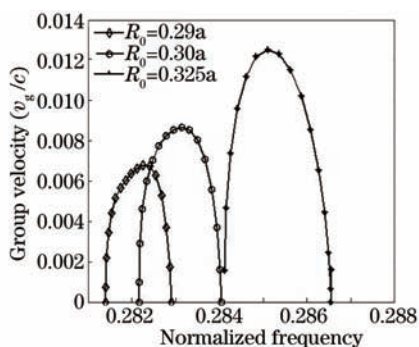


图6 群速度 v_g 特性曲线随 R_0 变化关系
Fig.6 Relationship between the v_g and R_0

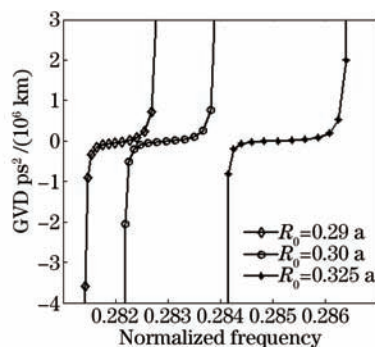


图7 群速度色散特性与 R_0 的变化关
Fig.7 Relationship between GVD and the R_0

4 对称波导与非对称波导的慢光特性对比

为了表征低色散慢光特性,定义慢光的平均群折射率 $\bar{n}_g = \frac{\sum n_{ig}(\lambda_i)}{N}$ 和相应的波长带宽 $\Delta\lambda = \lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}$,

群折射率平坦率 $\sigma = \frac{n_{g\text{max}} - n_{g\text{min}}}{2\bar{n}_g}$,规定群折射率平坦率 $\sigma \leq 10\%$,即群折射率 n_g 在 $(1 \pm 10\%) \bar{n}_g$ 范围内为低色散

慢光区域。延时带宽积(DBP, D_{BP})是反映慢光群速度与带宽综合性能的重要参数,它的表达式为: $D_{\text{BP}} = \Delta t \times \Delta\lambda$, Δt 是传输延时, $\Delta\lambda$ 是慢光带宽,由于 Δt 依赖于波导长度,在分析与比较中经常将DBP修正为归一化延时带宽积(NDBP, N_{DBP}),NDBP能较好地衡量不同波导在不同波长范围的慢光特性,NDBP可以表示为: $N_{\text{DBP}} = n_g \times \Delta\lambda / \lambda_0$, λ_0 为中心波长。NDBP的值越大,慢光导模的群速度与带宽特性越好。

分析上述对称结构与非对称结构的群折射率与NDBP(见表1),对比结构①、②、③与④,结构④的群折射率较大,而其NDBP较小,表明波导两侧首排为空气孔有利于增大群折射率,波导两侧首排为空气环有利于获得较宽的带宽。非对称结构⑤、⑥、⑦相比于对称结构①、②、③、④的NDBP提高约20%,表明非对称结构

结合了空气环与空气孔二者的优点,该非对称波导结构的慢光特性优于文中对称波导结构的慢光特性,且当空气孔 $R_0=0.3 a$ 时,不仅能获得较小的群速度 $v_g=0.0086 c$,而且低色散区波长范围达 6.588 nm ,延时带宽积 $N_{\text{DBP}}=0.5748$,实现宽带低色散慢光。

表 1 典型结构慢光综合特性的对比

Table 1 Slow light comprehensive properties comparison of typical structures

Structure features	Other scatterer's parameter	Parameters of the first rows next to waveguide	\bar{n}_g	λ_0/nm	$\Delta\lambda/nm$	N_{DBP}
Symmetrical structures	$R_{\text{out}}=0.45 a$ $R_{\text{in}}=0.13 a$	$R_{\text{out}}=0.45 a, R_{\text{in}}=0.13 a$ ^①	30.4	1515.15	16.706	0.3350
		$R_{\text{out}}=0.415 a, R_{\text{in}}=0.13 a$ ^②	33.0	1512.03	20.270	0.4423
		$R_{\text{out}}=0.415 a, R_{\text{in}}=0.17 a$ ^③	46.5	1575.37	10.156	0.2900
		$R_{\text{out}}=0.415 a, R_{\text{in}}=0 a$ ^④	63.6	1565.83	7.801	0.3169
Asymmetrical structures		$R_{\text{out}}=0.415 a, R_{\text{in}}=0.17 a, R_0=0.29 a$ ^⑤	168.3	1558.57	5.525	0.5966
		$R_{\text{out}}=0.415 a, R_{\text{in}}=0.17 a, R_0=0.3 a$ ^⑥	129.2	1554.22	6.588	0.5748
		$R_{\text{out}}=0.415 a, R_{\text{in}}=0.17 a, R_0=0.325 a$ ^⑦	92.5	1543.80	8.100	0.4850

5 结 论

通过空气环型散射元光子晶体线缺陷波导慢光特性分析,散射元的 $R_{\text{in}}/R_{\text{out}}$ 在合适的比值区间有利于宽带慢光的出现。相比于普通空气柱型或介质柱型光子晶体,空气环型光子晶体有更多的可控参数,波导上下两侧首排空气环的外半径 R_{out} 和内半径 R_{in} 作为调节慢光导模频率位置的参量,可优化慢光特性。设计出的新型非对称波导实现了宽带低色散慢光。

参 考 文 献

- 1 Yuji S, Toshihiko B. Stopping of light by dynamic tuning of photonic crystal slow light device[J]. Optics Express, 2010, 18(16): 17141-17153.
- 2 Ma P C, Xiao Y, Yu Y F, et al.. Microwave field controlled slow and fast light with a coupled system consisting of a nanomechanical resonator and a Cooper-pair box[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3621-3628.
- 3 Juntao L, Thomas P W, Faolino L O, et al.. Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides[J]. Optics Express, 2008, 16(9): 6227-6232.
- 4 Lü Shuyuan, Zhao Jianlin, Zhang Dong. Slow light transmission in two-dimension square photonic crystal waveguide[J]. Acta Photonica 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.
- 5 Hamel P, Grinberg P, Sauvan C, et al.. Coupling light into a slow-light photonic-crystal waveguide from a free-space normally-incident beam[J]. Optics Express, 2013, 21(13): 15144-15154.
- 6 Wang Yongjun, Wu Chongqin, Shu Da, et al.. Investigation on control technique of adjustable double loop optical buffer in large range [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(12): 1930-1934.
王拥军, 吴重庆, 疏 达, 等. 大范围可调的双环全光缓存器的控制技术的研究[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1930-1934.
- 7 Zhao Y, Zhang Y N, Wang Q. Optimization of slow light in slotted photonic crystal waveguide with liquid[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(14): 2448-2454.
- 8 Dong Xiaowei, Quan Wei, Liu Wenkai. Investigation on slow light in photonic crystal couple-cavity waveguide[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(2): 0223001.
董小伟, 权 炜, 刘文楷. 耦合腔光子晶体慢光波导结构研究[J]. 光子学报, 2015, 44(2): 0223001.
- 9 Xu Y M, Caer C, Gao D S, et al.. High efficiency asymmetric directional coupler for slow light slot photonic crystal waveguides[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 11021-11029.
- 10 Han Jintao, Zhang Wei, Wei Fengjuan, et al.. Investigation of wideband slow light in $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ photonic crystal slab waveguides[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0606002.
韩金涛, 张 巍, 魏凤娟, 等. $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫基光子晶体平板波导的宽带慢光特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0606002.
- 11 Wan Yong, Han Wenjuan, Jia Minghui, et al.. Slow light effect of couple waveguide with eye-shaped scatterers[J]. Acta Optica Sinica

- 2015, 35(3): 0313001.
万 勇, 韩文娟, 贾明辉, 等. 圆弓形散射元构建的耦合腔波导的慢光特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0313001.
- 12 Guo Yue, Zhang Zhiyun, Qiao Jinliang, *et al.*. Slow light effect of photonic crystal waveguides with silicon wafer by using crescent scatterers [J]. Journal of Qindao University (Nature Science Edition), 2015, 28(1): 35-40.
郭 月, 张志云, 桥金亮, 等. 月牙形散射元构建的二维硅基光子晶体波导的慢光效应[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2015, 28(1): 35-40.
- 13 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. 调整渐变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.
- 14 Saynatjoki A, Mulot M, Ahopelto J, *et al.*. Dispersion engineering of photonic crystal waveguides with ring-shaped[J]. Optical Express, 2007, 15(13): 8323-8328.
- 15 Liu Hui, Liu Dan, Zhang Heng, *et al.*. Study on complete photonic band gaps of two-dimensional air annular photonic crystals[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(19): 194208.
刘 会, 刘 丹, 张 恒, 等. 空气环型二维光子晶体完全带隙特性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(19): 194208.
- 16 Zhang Yaru, Kong Lingkai, Feng Zhuohong, *et al.*. Design of a two-dimensional photonic crystal with large photonic bandgap based on ring-shaped air holes[J]. Optical Technique, 2010, 36(2): 285-289.
刘亚茹, 孔令凯, 冯卓宏, 等. 基于空气环结构的大带隙二维光子晶体的设计[J]. 光学技术, 2010, 36(2): 285-289.
- 17 Zhao Y, Zhang Y N, Hu H F, *et al.*. Dispersion engineering of slow light in ellipse-shaped-hole slotted photonic crystal waveguide[J]. Lightwave Technol, 2014, 32(11): 2144-2151.
- 18 Li Changhong, Wan Yong, Mao Qiangming. Research of slow light performances of photonic crystal coupled resonator optical waveguides formed by oval rods cavities[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0416002.
李长红, 万 勇, 毛强明. 椭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, 35(4): 0416002.
- 19 Zhang Wei, Wang Zhiyong, Wang Wenchao, *et al.*. Investigation on wideband slow light base on photonic-crystal couple waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0212001.
张 伟, 王智勇, 王文超, 等. 基于光子晶体耦合腔波导的宽带慢光研究[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0212001.
- 20 Zhao Y, Zhang Y N, Wang Q, *et al.*. Review on the optimization methods of slow light in photonic crystal waveguide[J]. IEEE Transactions on Nano Technology, 2015, 14(3): 407-426.

栏目编辑: 张浩佳