

硫系 60° 弯曲光子晶体波导结构优化及传输特性研究

魏凤娟^{1,2} 张巍^{1,2*} 韩金涛^{1,2} 王贤旺^{1,2} 吴越豪^{1,2} 张培晴^{1,2} 戴世勋^{1,2} 聂秋华^{1,2}

¹ 宁波大学高等技术研究院红外材料与器件实验室, 浙江 宁波 315211

² 浙江省光电探测材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211

摘要 通过平面波展开法(PWE)计算硫系光子晶体带隙并采用时域有限差分法(FDTD)模拟硫系 60° 弯曲光子晶体波导的传输特性,在波导弯曲部分线缺陷处添加小空气孔缺陷,提高了其带宽和透光性。在 60° 弯曲区域线缺陷外边缘处引入 2 个对称空气孔,通过改变其半径来改善波导传输效率。模拟结果表明,当引入半径为 0.54R 的空气孔时,传输带宽由初始的 60 nm 提高到 161 nm,但此时透射率波动性较大。在此基础上在弯曲线缺陷中心处又引入若干个空气孔,当引入 3 个半径为 0.48R 的空气孔时,此种结构不但提高了波导的传输效率,并且使传输带宽增加到 340 nm。将单个 60° 弯曲波导优化结构应用于连续 60° 弯曲波导中,研究结果表明连续弯曲波导的传输效率得到显著提高。

关键词 集成光学; 硫系玻璃; 光子晶体波导; 传输效率; 带宽

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1205001

Transmission Characteristics and Structure Optimization of 60° Bent Chalcogenide Photonic Crystal Waveguides

Wei Fengjuan^{1,2} Zhang Wei^{1,2} Han Jintao^{1,2} Wang Xianwang^{1,2} Wu Yuehao^{1,2}
Zhang Peiqing^{1,2} Dai Shixun^{1,2} Nie Qihua^{1,2}

¹Laboratory of Infrared Materials and Devices, Advanced Technology Research Institute, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

²Key Laboratory of Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract The plane wave expansion method (PWE) is adopted to calculate chalcogenide photonic crystal bandgap, and finite difference time domain (FDTD) method is used to simulate transmission characteristics for 60° bent chalcogenide photonic crystal waveguide. Two symmetric air-holes are introduced in outer edge of line defects in the 60° bent region, in order to improve the transmission efficiency by adjusting the radii of the air-holes. The simulation result shows that transmission bandwidth is widened from the initial 60 nm to 161 nm while the radius of the air-holes is 0.54R, however, the transmission efficiency fluctuates violently. Then some more air-holes are introduced in the central line defect in bent region. It is noticed that when 3 air-holes with radius of 0.48R are added, not only the transmission efficiency is improvement, but also the transmission bandwidth is widened to 340 nm. Continuous bend of 60° waveguide structure optimization is similar to that of single one, and the result shows that the transmission efficiency in continuous bend of waveguide can be significantly improved.

Key words integrated optics; chalcogenide glass; photonic crystal waveguides; transmission efficiency; bandwidth

OCIS codes 130.5296; 060.4510; 160.5298; 230.0230

收稿日期: 2015-07-17; 收到修改稿日期: 2015-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(61107047, 61307060)、宁波市自然科学基金(2014A610125, 2015A610122)、“信息与通信工程”浙江省重中之重、宁波大学王宽城幸福基金

作者简介: 魏凤娟(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事硫系波导、硫系光子晶体波导的制备和损耗等方面的研究。

E-mail: weifj0520@sina.com

导师简介: 聂秋华(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学精密测量、光纤通信、特种光纤和红外光学材料等方面的研究。E-mail: nieqihua@nbu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: zhangwei3@nbu.edu.cn

1 引言

集成光学的快速发展为全光网络的实现提供了可能性,作为集成光学的基础原件,光波导应具有低损耗和高集成性等特征^[1-4]。为了减小光波导尺寸以达到高集成性的要求,可设计弯曲光路的波导结构,然而,传统全反射介质弯曲光波导具有一个严重的缺陷即弯曲半径必须限制到毫米级^[1],并且严重影响光传输效率。随着光子晶体(PhCs)的出现,这一问题可以得到有效的解决。光子晶体是一种新型光学结构,由不同折射率介质材料在空间中堆叠成周期性排布,会产生光子能带和光子带隙(光子禁带)^[4-7],并通过折射率的周期性调制进行光学传输。当某一个入射频率光落在光子能带中,这种频率的光可以在光子晶体中传输;当这种频率的光落在光子禁带中则不能在光子晶体中传输,但如果在光子晶体中引入线缺陷,即使光落在光子禁带中光也可以有效地进行传输^[7-8]。

中远红外区域光谱包含了绝大多数分子活动的特征谱线,3~5 μm 和 8~12 μm 这 2 个大气窗口在空气中相对透明且极其重要,是生物、化学传感研究的重要领域,因此研究中红外波段传感器件具有重要的现实意义。碲酸盐玻璃^[9]、氟化物玻璃^[10]和硫系玻璃^[11-13]都是性能优良的中红外材料,其中硫系玻璃具有较宽的红外透过窗口、超高的三阶非线性折射率系数 $n_2(n_2=2\sim 20\times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W})$ ^[11,14-20],是中红外传感器件的优良载体,在集成光学结构、低功率器件、未来全光网络等领域具有较大的潜在应用价值^[11,20]。

弯曲波导传输损耗大的一个重要原因是光在波导弯曲区域和直区域传输模式不匹配。相比于传统脊型波导或条形波导,光子晶体波导理论上可以实现任意弯曲角度低损耗的传输。在过去十几年来,在提高弯曲光子晶体波导的传输特性方面已经有多种方案被提出。Mekis 等^[6]首次报道了光在 90° 弯曲介质型正方晶格中传输,其传输效率在某些频率可以实现完全传输并且在很宽的频率范围内高达 95% 以上; Chutinan 等^[21-23]在波导的弯曲区域引入一个谐振腔来优化其传输特性,其传输带宽可以提高到 161 nm; Sarah 等^[4]通过引入光流体来提高弯曲波导传输效率,当在弯曲区域引入点缺陷并注入光流体,通过改变空气孔的半径和光流体的折射率,光在波导中传输效率得到大大提高,并且其带宽调整到 88~138 nm; 最后, Moghaddam 等^[18,24-25]通过改变线缺陷的宽度优化传输效率,传输带宽由 70 nm 增加到 160 nm。

本文选择 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ (折射率 $n=2.65$) 作为基质材料,在光子晶体波导的弯曲区域外边缘和中心位置处添加空气孔缺陷,通过改变其半径大小和个数,利用平面波展开法(PWE)和时域有限差分法(FDTD)进行优化模拟,使单个弯曲光子晶体波导的传输效率得到改善,传输带宽从 60 nm 提高到 340 nm; 同时使连续弯曲光子晶体波导的传输效率也得到提高。

2 60°弯曲光子晶体波导优化

图 1(a) 给出了 60° 弯曲三角晶格光子晶体波导的典型结构,这也正是本论文所研究弯曲光子晶体波导初始结构,它是在完整光子晶体中移除一条水平线缺陷以及与水平方向呈 60° 的线缺陷而形成的。其主要参数如下:空气孔半径 $R=0.36a$ (a 是晶格常数),基质材料为硫系材料 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 。利用 PWE 计算 TE 偏正模式下该结构完整硫系光子晶体的带隙频率范围为 0.3~0.4 (单位: $\omega a/2\pi c$)^[4,8]。为了使该光子晶体波导工作中红外波段,选择晶格常数 $a=1000 \text{ nm}$,工作波长 λ 范围为 2817~3278 nm。图 1(b) 给出了该 60° 弯曲波导结构的透

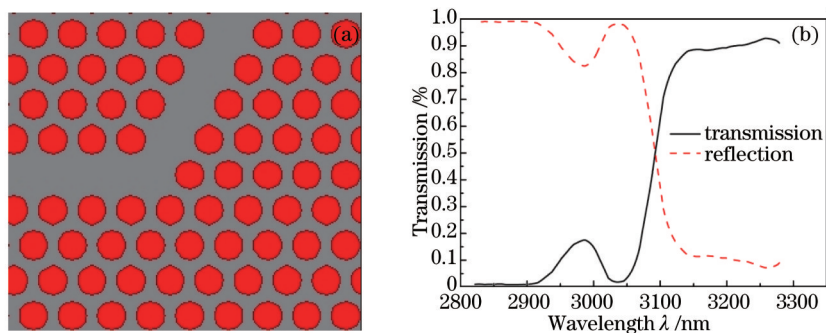


图 1 (a) 60° 弯曲光子晶体波导结构; (b) 60° 弯曲光子晶体波导传输谱和反射谱

Fig.1 (a) Structure of 60° bent waveguide in PhCs; (b) transmission and reflection spectra of 60° bent waveguide in PhCs

射谱。由图可以看出,某些波长的光能很好地在波导中传输,但总体而言,其传输带宽(传输效率高于90%的波长范围宽度)较窄(只有60 nm),因此需要对其结构进行优化,提高其传输效率。

首先在弯曲区域线缺陷外边缘处引入2个空气孔,通过改变空气孔半径大小来提高弯曲光子晶体波导传输效率,优化后的弯曲光子晶体波导结构如图2所示。虽然引入1个空气孔也能使波导弯曲区域保持对称,但弯曲区域平缓效果不佳,因此引入2个空气孔保证了波导结构的对称性和弯曲区域的平缓度,这里引入的空气孔半径 r 分别为 $0.6R, 0.54R, 0.48R, 0.42R$,2个空气孔中心距离为520 nm。最后得到对应的传输效率如图3所示,表1给出了对应结构的传输带宽。

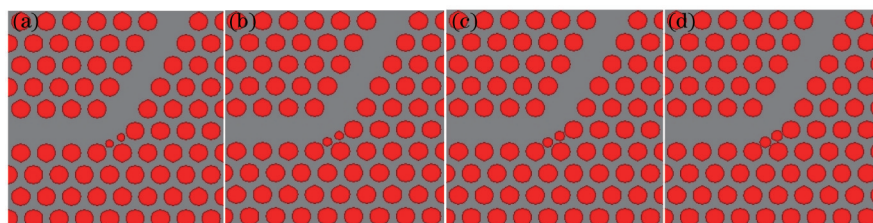


图2 具有2个不同半径对称空气孔的二维(2D)弯曲光子晶体波导。(a) $r=0.42R$; (b) $r=0.48R$; (c) $r=0.54R$; (d) $r=0.60R$

Fig.2 Bent waveguides in a 2D PhC with two additional symmetric air-holes of different radii.
(a) $r=0.42R$; (b) $r=0.48R$; (c) $r=0.54R$; (d) $r=0.60R$

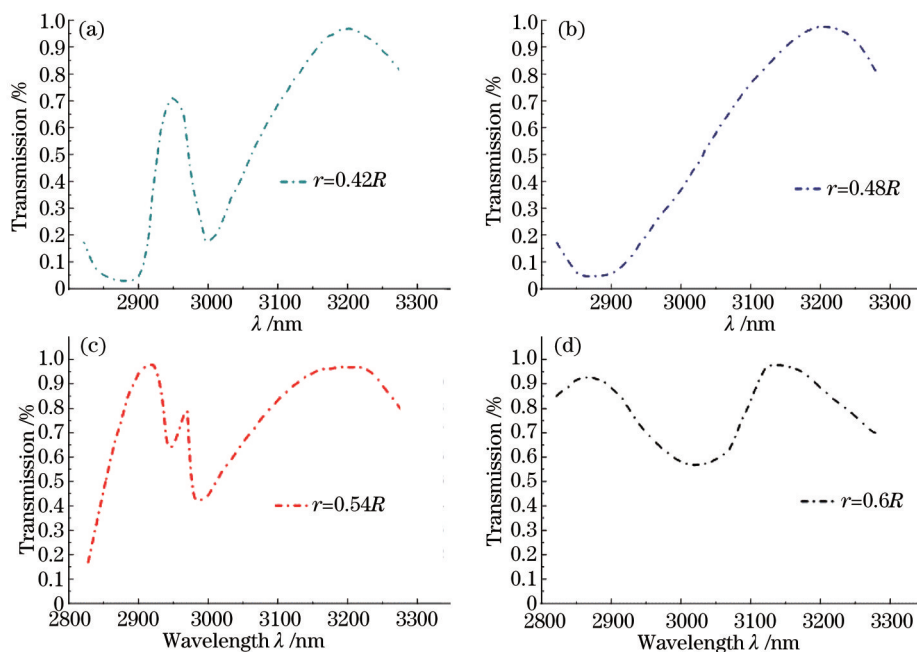


图3 添加的不同半径对称空气孔的传输效率。(a) $r=0.42R$; (b) $r=0.48R$; (c) $r=0.54R$; (d) $r=0.60R$

Fig.3 Transmission efficiencies for two additional symmetric air-holes of different radii. (a) $r=0.42R$; (b) $r=0.48R$; (c) $r=0.54R$; (d) $r=0.60R$

表1 添加的不同半径对称空气孔的带宽

Table 1 Bandwidths for two additional symmetric air-holes of different radii

r	Bandwidth /nm
$0.42R$	99
$0.48R$	128
$0.54R$	161
$0.6R$	118

与图1(b)相比,图3所示传输效率明显得到了改善,并且传输带宽也有一定程度提高。图3中传输带宽随着空气孔半径的增加而增大。当空气孔半径增加到 $0.54R$ 时[见图3(c)],传输带宽达到极大值,传输效率在一定波长范围内相对平坦。当空气孔半径 $r=0.6R$ 时[见图3(d)],虽然传输效率的波动比图3(c)要小得多,但是传输带宽开始下降(由表1可以看出,空气孔半径 $r=0.54R$ 时传输带宽是最大的),此外空气孔半径 $r=0.6R$,将会导致2个空气孔之间间隙变小,后续的准备工艺难度有所增加。

为了进一步优化带宽特性,在图 2(c)结构基础之上,在弯曲区域线缺陷中心处继续引入空气孔,通过改变空气孔个数来提高波导传输效率。假设引入空气孔个数 $N=0, 1, 3, 5$, 空气孔半径大小均为 $0.48R$ (半径大小为 $0.48R$ 模拟效果最佳)。最终得到波导结构如图 4 所示 ($N=1$ 时新引入空气孔处于弯曲区域线缺陷中心位置,与图 2(c)两个优化空气孔的距离均为 520 nm , $N=3$ 和 $N=5$ 时其余空气孔处于线缺陷中心位置,与新引入空气孔的距离为 1000 nm), 图 5 给出相对应的传输效率图, 表 2 给出了对应结构的传输带宽。

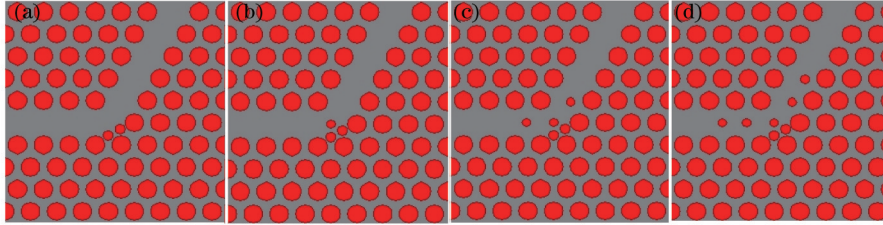


图 4 在线缺陷中心处添加 N 个空气孔的二维弯曲光子晶体波导。(a) $N=0$; (b) $N=1$; (c) $N=3$; (d) $N=5$
 Fig.4 Bent waveguides in 2D PhC with additional air-holes of different numbers N in center of line defect.
 (a) $N=0$; (b) $N=1$; (c) $N=3$; (d) $N=5$

从模拟结果可以明显看出进一步优化后的传输效率相比初步优化得到很大程度地提高。图 5(a)给出了初步优化结构对应的传输效率,此时引入空气孔个数 $N=0$; 当空气孔个数增加到 1 时[如图 4(b)所示], 其对应传输效率得到提高并且传输带宽增加到 263 nm ; 当空气孔个数 $N=3$ 时, 传输带宽达到最大值 340 nm , 并且在整个波长范围内传输效率相对平坦[如图 5(c)所示]; 图 5(d)给出了空气孔个数 $N=5$ 的传输效率, 此时传输带宽只有 74 nm , 之后随着 N 增加传输效率会继续减小。根据以上分析, 可以得出当空气孔个数 $N=3$ 时, 60° 弯曲光子晶体波导结构具有最高的传输效率和带宽。

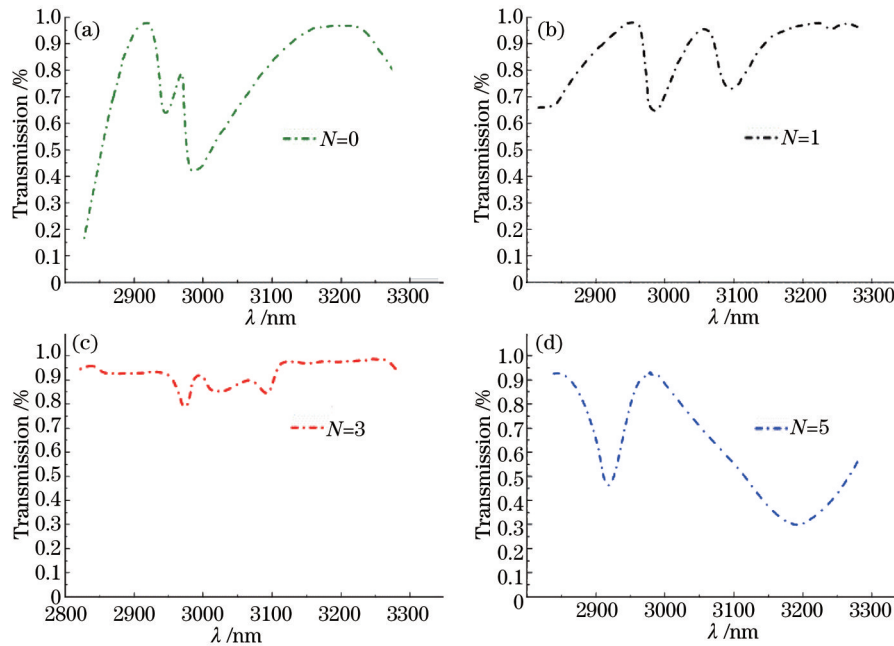


图 5 添加 N 个空气孔的传输效率。(a) $N=0$; (b) $N=1$; (c) $N=3$; (d) $N=5$
 Fig.5 Transmission efficiencies for N additional air-holes. (a) $N=0$; (b) $N=1$; (c) $N=3$; (d) $N=5$

表 2 添加 N 个空气孔的带宽

Table 2 Bandwidth for N additional air-holes

Number	Bandwidth /nm
0	161
1	263
3	340
5	74

3 连续 60° 弯曲光子晶体波导优化

传统的连续弯曲光子晶体波导结构如图 6(a) 所示, 其对应的传输效率如图 6(b) 所示, 由图可以看出这种结构的光子晶体波导传输效率极低, 在很宽的波长范围内光几乎不能传输。

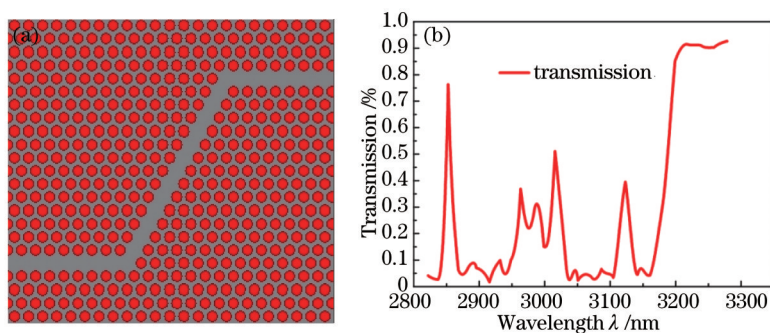


图 6 传统的连续 2 个 60° 弯曲光子晶体波导 (a) 结构和 (b) 传输效率

Fig.6 (a) Structure and (b) transmission efficiency of original two 60° consecutive bent PhC waveguide

基于图 4(c) 的优化方案, 将其应用到传统的连续 60° 弯曲光子晶体波导结构, 优化后的结构如图 7(a) 所示。在该结构中, 2 个弯曲区域线缺陷外边缘处空气孔半径都为 $0.54R$, 在弯曲区域线缺陷中心处添加的空气孔半径为 $0.48R$ 。图 7(b) 给出了优化后波导结构的传输效率图, 与图 6(b) 相比, 容易发现传输效率得到了显著提高。通过以上单个 60° 和连续 60° 硫系基质光子晶体波导的结构优化, 结果表明该优化后的硫系弯曲光子晶体波导结构在中红外波段具有优良的传输性能。这种新型的弯曲波导结构设计可以扩展传输带宽, 降低传输损耗, 为未来全光网络的实现奠定基础。

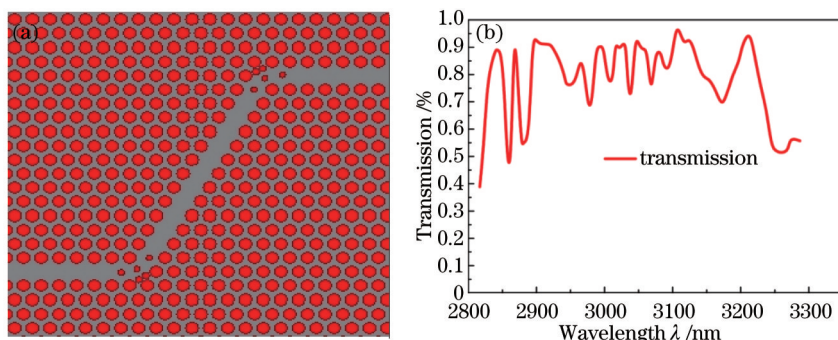


图 7 优化过的连续 60° 弯曲光子晶体波导 (a) 结构和 (b) 传输效率

Fig.7 (a) Structure and (b) transmission efficiency of the optimized two 60° consecutive bent PhC waveguide

4 结 论

通过 PWE、FDTD 模拟单个 60° 和连续 60° 硫系弯曲光子晶体波导传输特性。在光子晶体波导弯曲区域外边缘处引入 2 个对称空气孔, 通过改变空气孔半径 r 来提高传输效率。选择空气孔半径 $r=0.42R, 0.48R, 0.54R, 0.6R$, 模拟结果表明, 当空气孔半径 $r=0.54R$ 时, 传输效率波动相对较小并且传输带宽达到 161 nm。因此, 将弯曲区域线缺陷外边缘处 2 个空气孔半径 $r=0.54R$ 作为初次优化结果。然后在弯曲区域线缺陷中心处引入若干空气孔, 通过改变空气孔个数来提高传输效率, 模拟结果表明当引入 3 个半径为 $0.48R$ 的空气孔时, 传输带宽达到最大 (340 nm)。利用以上方法对连续 60° 弯曲光子晶体波导结构进行优化, 结果表明, 经过优化的连续 60° 弯曲波导传输效率和带宽都可得到一定程度的提高。本论文的研究结论可为 60° 弯曲光子晶体波导在中红外波段的传输应用提出一种更优的结构方案。

参 考 文 献

- 1 K Rauscher, D Erni, J Smajic, *et al.*. Improved transmission for 60° photonic crystal waveguide bends[J]. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2004: 25-28.
- 2 L Dekkiche, R Naoum. Optimal design of 90° bend in two dimensional photonic crystal waveguides[J]. Journal of Applied Sciences, 2008,

- 8(13): 2449–2455.
- 3 C Z Zhou, Y Z Liu, Z Y Li. Waveguide bend of 90° in two-dimensional triangular lattice silicon photonic crystal slabs[J]. Chin Phys Lett, 2010, 27(8): 084203.
- 4 B Sarah, M K Moravvej-Farshi, M Ebnali-Heidari. Proposal for enhancing the transmission efficiency of photonic crystal 60° waveguide bends by means of optofluidic infiltration[J]. Appl Opt, 2011, 50(21): 4048–4053.
- 5 L H Frandsen, A Harpøth, P I Borel, *et al.*. Broadband photonic crystal waveguide 60° bend obtained utilizing topology optimization[J]. Opt Express, 2004, 12(24): 5916–5921.
- 6 A Mekis, J C Chen, I Kurland, *et al.*. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. Phys Rev Lett, 1996, 77(18): 3787–3790.
- 7 D Freeman, S Madden, B Luther-Davies. Fabrication of planar photonic crystals in a chalcogenide glass using a focused ion beam[J]. Opt Express, 2005, 13(8): 3079–3086.
- 8 M Khatibi Moghaddam, M M Mirsalehi, A R Attari, *et al.*. A 60° photonic crystal waveguide bend with improved transmission characteristics [J]. Optica Applicata, 2009, 39(2): 307–317.
- 9 L Zhang, T Cheng, D Deng, *et al.*. Tunable soliton generation in a birefringent tellurite microstructured optical fiber[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2015, 27(14): 1547–1549.
- 10 Qin G, Yan X, Kito C, *et al.*. Ultrabroadband supercontinuum generation from ultraviolet to $6.28 \mu\text{m}$ in a fluoride fiber[J]. Appl Phys Lett, 2009, 95(16): 1103.
- 11 Wang Xianwang, Zhang Wei, Zhang Liang, *et al.*. Research progress of fabrication of chalcogenide glass photonic crystal waveguide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 120001.
王贤旺, 张 巍, 章 亮, 等. 硫系玻璃光子晶体光波导的制备研究发展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 120001.
- 12 Zhang Liang, Zhang Wei, Nie Qihua, *et al.*. Research progress of tow-dimensional crystal waveguide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030008.
章 亮, 张 巍, 聂秋华, 等. 二维光子晶体波导研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030008.
- 13 Liu Shan, Shen Xiang, Xu Tiefeng, *et al.*. Dispersion characteristics of $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ chalcogenide rib waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0513001.
刘 珊, 沈 祥, 徐铁峰, 等. $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫系脊型光波导的色散特性[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0513001.
- 14 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.
- 15 L Zhang, W Zhang, X Wang, *et al.*. Investigation of $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ photonic crystal slab waveguides with slow light at infrared wavelength [J]. Optical Materials Express, 2013, 3(9): 1438–1443.
- 16 K Suzuki, Y Hamachi, T Baba. Fabrication and characterization of chalcogenide glass photonic crystal waveguides[J]. Opt Express, 2009, 17(25): 22393–22400.
- 17 Y Chen, X Shen, R Wang, *et al.*. Optical and structural properties of Ge-Sb-Se thin films fabricated by sputtering and thermal evaporation [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 548(25): 7–12.
- 18 C Grillet, C Smith, D Freeman, *et al.*. Efficient coupling to chalcogenide glass photonic crystal waveguides via silica optical fiber nanowires [J]. Opt Express, 2006, 14(3): 1070–1078.
- 19 K Suzuki, T Baba. Nonlinear light propagation in chalcogenide photonic crystal slow light waveguides[J]. Opt Express, 2010, 18(25): 26675–26685.
- 20 C Smith, C Grillet, S Tomljenovic-Hanic, *et al.*. Characterisation of chalcogenide 2D photonic crystal waveguides and nanocavities using silica fibre nanowires[J]. Physica B: Condensed Matter, 2007, 394(2): 289–292.
- 21 A Chutinan, S Noda, Alongkarn. Waveguides and waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs[J]. Phys Rev B, 2000, 62(15): 4488–4492.
- 22 Chutinan, M Okano, S Noda. Wider bandwidth with high transmission through waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs [J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(10): 1698–1700.
- 23 M Dinu, R L Willett, K Baldwin, *et al.*. Waveguide tapers and waveguide bends in AlGaAs-based two-dimensional photonic crystals[J]. Appl Phys Lett, 2003, 83(22): 4471–4473.
- 24 P F Xing, P I Borel, L H Frandsen, *et al.*. Optimization of bandwidth in 60° photonic crystal waveguide bends[J]. Opt Commun, 2005, 248(1–3): 179–184.
- 25 Z Hu, Y Y Lu. Improved bends for two-dimensional photonic crystal waveguides[J]. Opt Commun, 2011, 284(12): 2812–2816.

栏目编辑: 王晓琰