

doi: 10.3788/gzxb20144306.0606003

3~5 μm 宽带超低色散平坦硫系光子晶体光纤

曹凤珍¹, 张培晴^{1,2}, 戴世勋¹, 王训四¹, 徐铁峰¹, 聂秋华¹

(1 宁波大学 高等技术研究院 红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211)

(2 中山大学 光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

摘 要: 利用硫系光子晶体光纤色散可控特性, 设计了一种宽带超低色散平坦硫系光子晶体光纤, 采用多极法研究了孔间距和占空比等参量对色散曲线的影响. 通过优化包层中不同层数空气孔的直径, 获得内两层气孔半径为 0.7 μm , 外两层气孔半径为 0.8 μm 和孔间距为 5 μm 的光子晶体光纤结构. 模拟结果显示, 该光纤在 3~5 μm 波段可实现宽带色散平坦, 且色散绝对值低于 3.8 $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$.

关键词: 光子晶体光纤; 平坦色散; 多极法; 硫系玻璃; 中红外

中图分类号: TN253; TN213

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)06-0606003-6

3~5 Microns Chalcogenide Photonic Crystal Fiber with Broadband Ultra-low Flattened Dispersion

CAO Feng-zhen¹, ZHANG Pei-qing^{1,2}, DAI Shi-xun¹, WANG Xun-si¹, XU Tie-feng¹, NIE Qiu-hua¹

(1 Laboratory of Infrared Material and Devices, The Advanced Technology Research Institute, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

(2 State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yatsen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Using the dispersion controlled feature of chalcogenide photonic crystal fiber, the broadband ultralow dispersion-flattened chalcogenide photonic crystal fibers was designed, and the multipole method was used to research the effects of the hole pitch and the aperture ratio on the dispersion curves. By optimizing the diameter of the air holes of different layers in cladding, the structure with 0.7 μm air hole radius of inside two layers, 0.8 μm air hole radius of outer two layers and 5 μm hole pitch were obtained. The simulation results show that this structure is broadband flattened dispersion in 3~5 μm , and the absolute value of dispersion is less than 3.8 $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$.

Key words: Photonic crystal fiber; Flattened dispersion; Multipole method; Chalcogenide glass; Mid-infrared

OCIS Codes: 060.2280; 060.4370; 060.5295

0 引言

色散作为光纤的固有属性之一, 可以通过合理调节来发挥重要作用. 光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF) 在色散控制方面具有独特的优势, 其对光纤色散的调节通常包括两类: 一是设计大负色散 PCF,

用以补偿传统光纤在通信中的色散偏差; 二是设计近零平坦色散 PCF^[1]. 其中, 低且近零平坦色散可用于高效、均衡的超连续谱的产生^[2-3], 光孤子的产生和传输^[4], 基于色散平坦 PCF 产生四波混频 (Four-Wave Mixing, FWM) 的研究^[5] 以及基于 FWM 效应在波长转换方面的应用^[6-10] 等引起学者广泛的兴趣.

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61177087, 61307060)、国家科技部重大国际合作项目 (No. 2001DFA12040)、教育部新世纪优秀人才计划项目 (No. NCET-10-0976)、浙江省杰出青年基金 (No. R1101263)、浙江省自然科学基金 (No. LQ12F05004)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队项目 (No. 2009B21007)、宁波市自然科学基金 (No. 2012A610116)、光电材料与技术国家重点实验室开放基金和宁波大学王宽诚幸福基金资助

第一作者: 曹凤珍 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为红外硫系玻璃光纤非线性. Email: cfz229@163.com

导师 (通讯作者): 聂秋华 (1954-), 男, 教授, 主要研究方向为光通信与光纤材料等. Email: nieqiuhoa@nbu.edu.cn

收稿日期: 2013-09-04; **录用日期:** 2013-12-17

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

硫系玻璃作为一种新型红外光学材料,是以第VI主族的S、Se、Te为主要成分,结合As、Ge、P、Sb、Al、Si等元素化合形成玻璃态物质.在硫系玻璃中引入卤素还可形成硫卤化物玻璃以获得奇特的红外光学特性^[11].

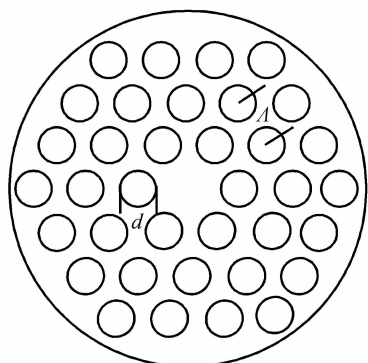
硫系玻璃具有极高的非线性系数($2\sim 20\times 10^{-18}$ m²/W,是石英材料的100~1 000倍)和优良的红外透过性(透过范围可从0.5~1 μm到12~25 μm)^[12-13],此外,硫系PCF因其灵活多变的结构,具备许多传统光纤不具备的优良光学特性,如无截止单模、模场面积可调和色散可控等^[14-15].研究发现,可以通过改变包层空气孔的结构,实现光纤色散特性的精确控制.如在特定占空比条件下,可根据硫系PCF的色散随空气孔间距的变化来自由调节硫系PCF的色散零点;为获得具有平坦色散特性的PCF,可以通过优化空气孔占空比实现对光纤色散平坦度的调整^[16-23].

目前国外已开展的光子晶体光纤色散特性研究及制备工作多集中在As₂Se₃^[16,19]和As₂S₃^[18,20]玻璃基质材料中,国内则多集中于石英材料^[24-25],而对于无As环保型的硫系玻璃光子晶体光纤中红外色散特性的研究鲜有报道.本文以无As环保型Ge₂₃Sb₁₂S₆₅硫系玻璃为基质材料,设计用于中红外波段的光子晶体光纤.Ge₂₃Sb₁₂S₆₅硫系玻璃在中红外波段的透过率可达到80%,非线性折射率可达到 5.82×10^{-13} cm²/W^[13].通过优化包层空气孔参量,获得了在3~5 μm波段低色散且色散平坦的PCF结构.

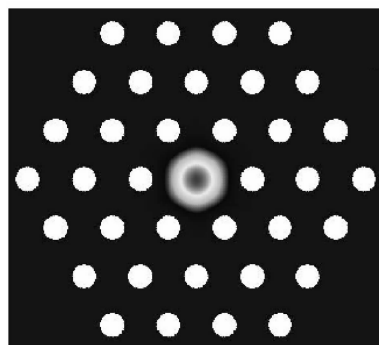
1 硫系PCF色散特性分析

1.1 结构设计

硫系PCF的基本结构如图1.图中气孔直径 $d=1.6$ μm,孔间距 $\Lambda=4$ μm.利用多极法分析不同的空气孔直径、孔间距和空气孔层数对光纤色散及损耗的影响,通过优化结构参量获得具有宽带低色散且色散平坦的PCF结构参量.



(a) Structure schematic drawing

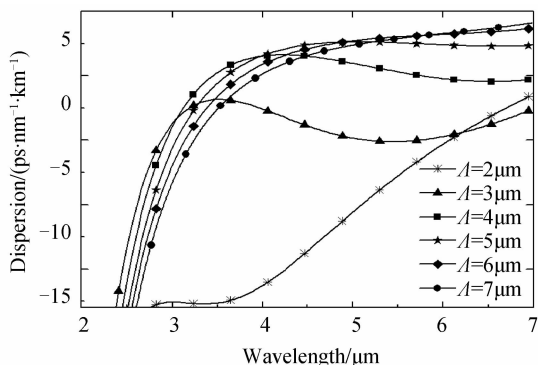


(b) Mode field distribution

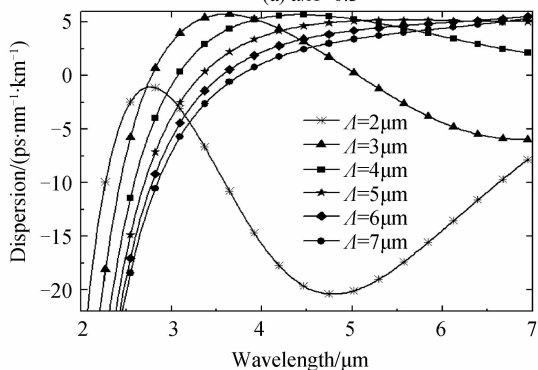
图1 设计的PCF结构示意图及基模传输模式模场分布图
Fig.1 The structure schematic drawing of designed PCF and the mode field distribution diagram of fundamental mode transfer mode

1.2 孔间距变化对色散的影响

为了得到3~5 μm的宽带超低平坦色散硫系PCF,首先要通过控制包层空气孔间距调节光纤的色散零点,使色散在3 μm波长处为零.图2为 $d/\Lambda=0.3, 0.4$ 和 0.45 时,色散曲线随孔间距 Λ 改变而变化的曲线.由图2可得,在3 μm波长处,当 $d/\Lambda=0.3$ 时,色散值均小于0;当 $d/\Lambda=0.4, \Lambda=4$ μm时,在3 μm波长附近出现了零色散点;当 $d/\Lambda=0.45, \Lambda=2$ μm、3 μm、4 μm时,均接近零色散点.因此推断符合要求的光纤结构应是通过调节图2(b)和(c)中的参量得到的.



(a) $d/\Lambda=0.3$



(b) $d/\Lambda=0.4$

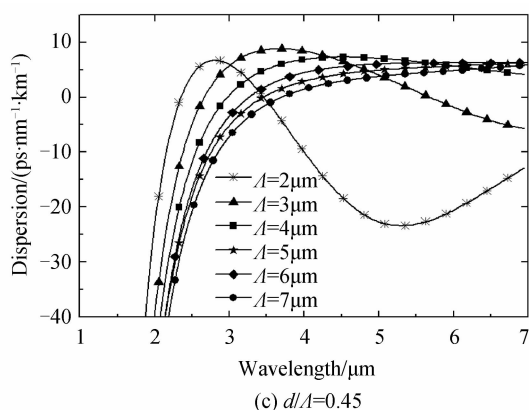


图2 光纤中空气孔占空比不同时,孔间距 Λ 对色散特性的影响

Fig. 2 The hole pitch Λ having an effect on dispersion with the aperture ratio

1.3 占空比变化对色散的影响

为了获得宽带平坦低色散疏系 PCF, 分别研究了孔间距 $\Lambda=2 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 和 $4 \mu\text{m}$ 时, 占空比 d/Λ 对色散特性的影响, 计算结果如图 3. 从图 3 可以看到, 图 3(a) 中的色散平坦性很差; 图 3(b) 中的色散平坦性较图 3(a) 要好, 但是色散零点不符合设计要求; 图 3(c) 中只有 $d/\Lambda=0.4$ 比较接近色散零点. 因此选取 PCF 的结构参量为 $d/\Lambda=0.4$, $\Lambda=4 \mu\text{m}$, 此时色散曲线在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段趋于平坦.

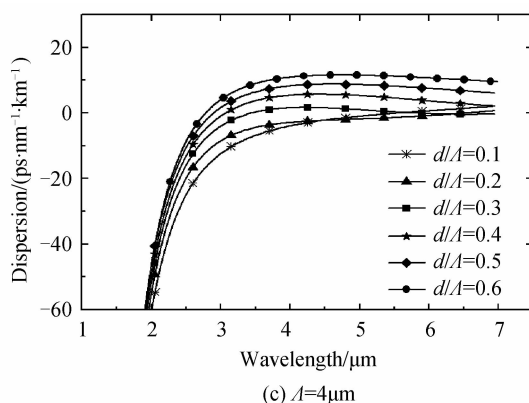
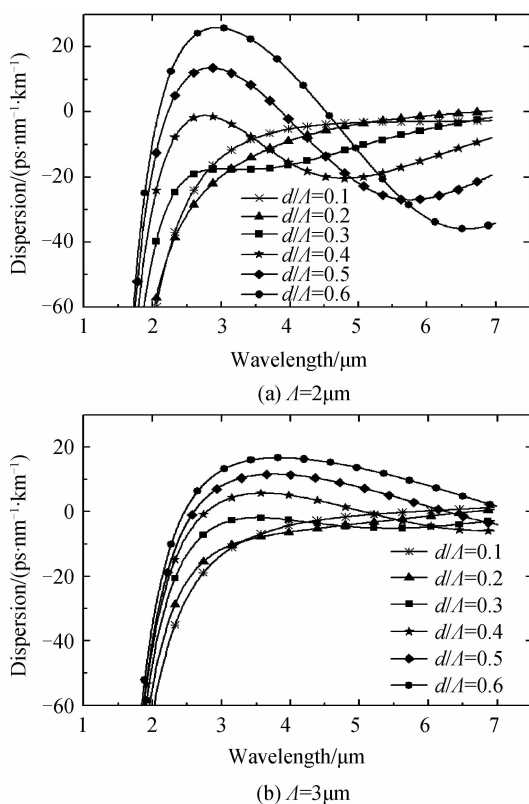


图3 孔间距不同时, 占空比 d/Λ 对色散特性的影响
Fig. 3 The aperture ratio d/Λ having an effect on dispersion with the hole pitch

1.4 损耗和色散分析

损耗是影响光纤性能的重要参量. 在设计光纤色散特性的同时, 分析了光纤结构对光纤限制损耗的影响. 对 1.2 和 1.3 节中获得的 3 层空气孔包层 PCF 结构(图 1(a)) 计算了占空比 $d/\Lambda=0.4$, 孔间距 $\Lambda=4 \mu\text{m}$ 时光纤的限制损耗, 如图 4, 可知光纤在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的限制损耗为 $0.5 \sim 18 \text{ dB/m}$. 虽然此光纤具有良好的

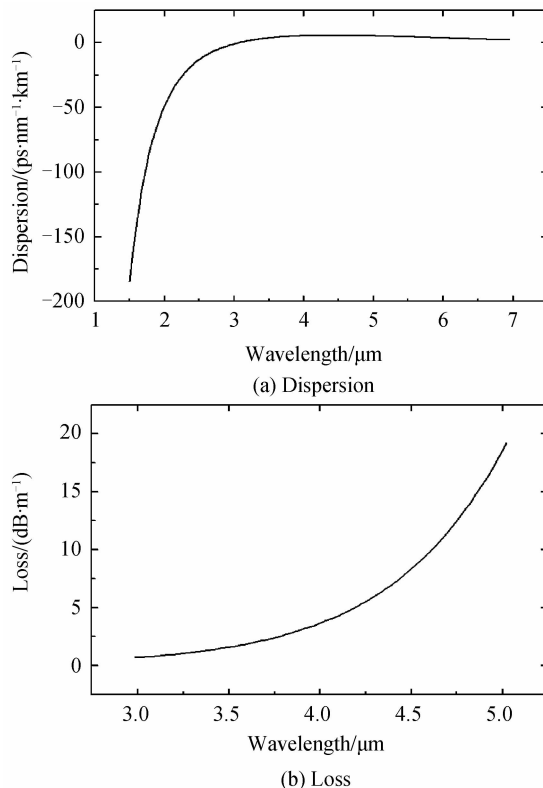


图4 孔间距 $\Lambda=4 \mu\text{m}$, 占空比 $d/\Lambda=0.4$ (孔径层数 $N=3$) 时对色散特性的影响

Fig. 4 The effect on dispersion when the hole pitch $\Lambda=4 \mu\text{m}$, the aperture ratio $d/\Lambda=0.4$ (aperture layer number $N=3$)

色散特性,在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段色散值的变化仅为 $-1 \sim 5.6 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,但损耗值仍较大,不利于实际应用.

理论模拟发现,对于多层空气孔包层 PCF,模场基本被限制在三层空气孔以内,很难到达第四层及以后各层,PCF 的色散基本上由前三层空气孔确定下来.因此,当空气孔层数增加时,对已设计的近零平坦色散 PCF 的色散值仅产生微小的影响,但对于光纤的限制损耗影响非常大^[5],每增加一层空气孔,都能使 PCF 的损耗大幅度降低^[26-27].因此可以通过增加空气孔的层数来降低 PCF 的限制损耗,同时不必担心增加的空气孔会对已设计近零平坦色散的光纤有大的影响.考虑到光纤制备的复杂性和程序的计算时间,针对上述分析,在之前设计的 PCF 结构上增加一圈空气孔,使得光纤的限制损耗降低到满足应用的需求,又不会明显增加制备的困难和程序计算时间.最终的计算结果显示,光纤的限制损耗范围降低到 $0.01 \sim 0.6 \text{ dB/m}$,而光纤的色散范围基本保持不变,仍然是 $-1 \sim 5.6 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,计算结果如图 5.

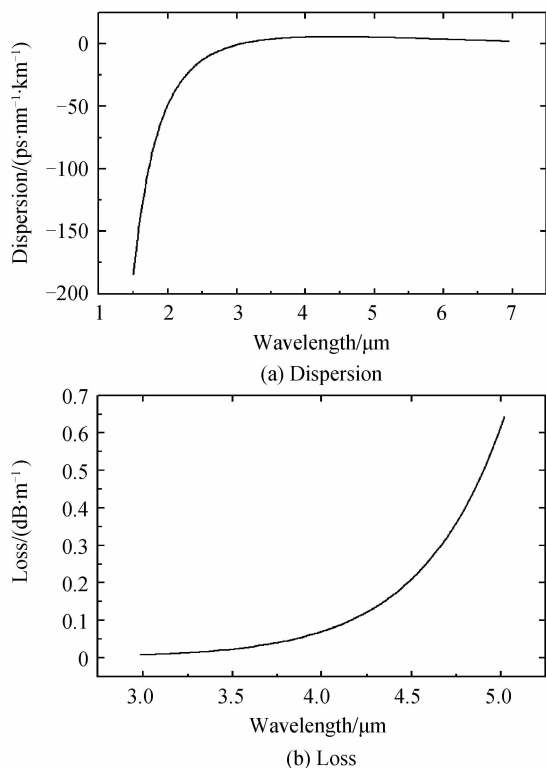


图 5 孔间距 $\Lambda=4 \mu\text{m}$, 占空比 $d/\Lambda=0.4$ (孔径层数 $N=4$) 时对色散特性的影响
 Fig. 5 The effect on dispersion when the hole pitch $\Lambda=4 \mu\text{m}$, the aperture ratio $d/\Lambda=0.4$ (aperture layer number $N=4$)

为了进一步降低设计的 PCF 的色散,通过改变内外包层空气孔的直径来优化光纤的传输特性.改进后的光纤结构如图 6(a)所示,内两层气孔半径相同,外两层气孔半径相同,孔间距仍保持为 $5 \mu\text{m}$.图 7 给出了光纤色散及限制损耗随内两层半径的改变而变化的趋

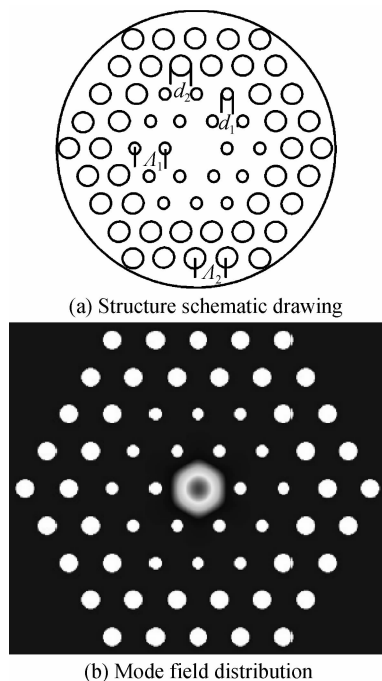


图 6 具有四层气孔的实芯 PCF 结构示意图和基模传输模式模场分布图
 Fig. 6 The structure schematic drawing of solid core PCF with four layers air hole and the mode field distribution diagram of fundamental mode transfer mode

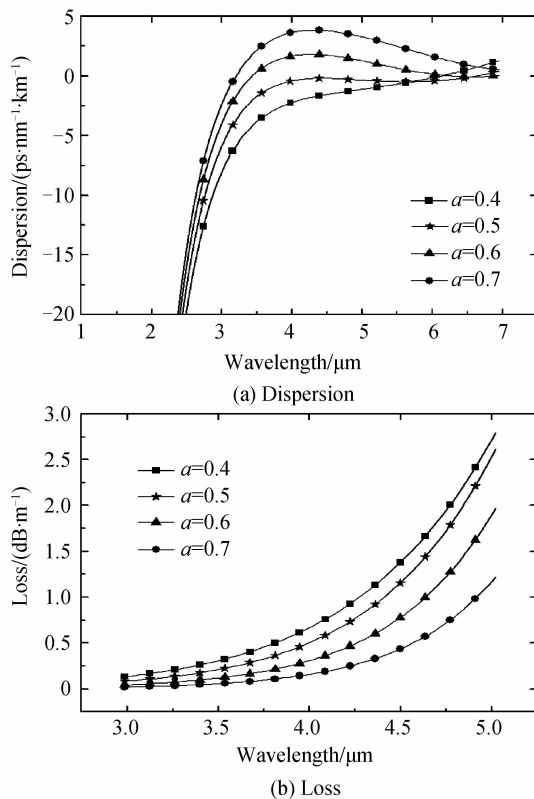


图 7 最内两层半径 a 的变化对光纤色散和损耗的影响
 Fig. 7 The effect on the fiber's dispersion and loss when within the two layers' radius a change

势,从图 7(a)中可以看出,当内两层包层空气孔半径为 $0.7 \mu\text{m}$ 时,光纤在 $3 \mu\text{m}$ 处最接近色散零点,且色散在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 比较平坦,色散范围为 $-2.7\sim 3.8 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$;在图 7(b)中可以看出,内两层空气孔半径为 $0.7 \mu\text{m}$ 也是限制损耗范围最小的情况.虽然将内两层空气孔的半径降低为 $0.7 \mu\text{m}$ 将使得光纤的限制损耗较孔径均匀的四层结构来说略有增加,但光纤的色散却更加平坦.因此选取该结构为最优化的光纤结构,其中,光纤的最内两层气孔直径相同,为 $d_1 = 1.4 \mu\text{m}$,剩下的最外两层气孔直径 $d_2 = d = 1.6 \mu\text{m}$ (如图 6(a)),孔间距 $\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda = 5 \mu\text{m}$.

2 结论

本文设计了一种 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_{12}\text{S}_{65}$ 硫系 PCF,采用多极法研究了包层结构参量对光纤的色散和限制损耗的影响.经过结构优化最终得到 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 波段色散平坦的低损耗光子晶体光纤.该 PCF 的包层空气孔层数为 4,内两层气孔半径为 $0.7 \mu\text{m}$,外两层气孔半径为 $0.8 \mu\text{m}$,光纤在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 能实现宽带色散平坦,且色散绝对值低于 $3.8 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$,此范围内光纤的限制损耗值范围为 $0.03\sim 1.2 \text{ dB/m}$.所设计的光纤在低损耗能量传输、生物传感和超连续谱的产生等方面具有重要的应用价值.

参考文献

- [1] NI Zhi-cheng. The research of dispersion characteristics and application of photonic crystal fiber[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2009.
倪志成. 光子晶体光纤色散特性及应用的研究[D].南京:南京邮电大学,2009.
- [2] RUSSELL P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358-362.
- [3] DAI Neng-li, LI Yang, PENG Jing-gang, *et al.* The research of flattened dispersion photonic crystal fiber[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(001):1-8.
戴能利,李洋,彭景刚,等.色散平坦光子晶体光纤的研究进展[J].激光与光电子学进展,2011, **48**(001):1-8.
- [4] WADSWORTH W, KNIGHT J, ORTIGOSA-BLANCH A, *et al.* Soliton effects in photonic crystal fibers at 850 nm [J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(1): 53-55.
- [5] CERQUEIRA S, MARCONI J D, RIEZNIK A A, *et al.* Multiple four-wave mixing in ultra-flattened dispersion photonic crystal fibers [C]. Optical Fiber communication, National Fiber Optic Engineers Conference, 2008, Conference on. IEEE: 1-3.
- [6] ZHANG Xia, REN Xiao-min, WANG Zi-nan, *et al.* Four-wave mixing based 10-Gb/s tunable wavelength conversion in dispersion-flattened microstructure fibers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, **5**(7): 386-388.
- [7] SHAO Xiao-jie, YANG Dong-xiao, GENG Dan. The studies of wavelength conversion of four-wave mixing based on photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 652-655.
邵潇杰,杨冬晓,耿丹.基于光子晶体光纤四波混频效应的波长转换研究[J].光子学报,2009, **38**(3):652-655.
- [8] WANG Qiu-guo, ZHANG Hu, ZHANG Xia, *et al.* The experimental study of four-wave mixing in photonic crystal fiber[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(3): 415-417.
王秋国,张虎,张霞,等.光子晶体光纤中的四波混频实验研究[J].半导体光电,2008, **29**(3):415-417.
- [9] ZHANG Lan, YANG Bo-jun, WANG Qiu-guo, *et al.* The research of all-optical wavelength conversion based on photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2203-2205.
张岚,杨伯君,王秋国,等.基于光子晶体光纤的全光波长变换研究[J].光子学报,2008, **37**(11):2203-2205.
- [10] ZHOU Hui-li, ZHANG Xia, GAO Jian, *et al.* The research of achieving optical wave conversion in flattened dispersion photonic crystal fiber [J]. *Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(1): 28-31.
周会丽,张霞,高健,等.色散平坦光子晶体光纤中实现光波变换的研究[J].光电子·激光,2009, **20**(1):28-31.
- [11] XU Yan-tao, GUO Hai-tao, LU Min, *et al.* Research progress of high nonlinear chalcogenide glass[J]. *Materials Review*, 2010, **24**(10): 49-53.
许彦涛,郭海涛,陆敏,等.高非线性硫系玻璃的研究进展[J].材料导报,2010, **24**(10):49-53.
- [12] SMEKTALA F, BRILLAND L, CHARTIER T, *et al.* Recent advances in the development of holey optical fibers based on sulphide glasses [C]. Integrated Optoelectronic Devices 2006, International Society for Optics and Photonics, 2006, 61280M-8.
- [13] ZHANG Hua, NIE Qiu-hua, DAI Shi-xun, *et al.* Investigation of nonlinear optical properties of $\text{GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ chalcogenide glasses[J]. *Bull Chin Ceram Soc*, 2008(03): 466-470+480.
张花,聂秋华,戴世勋,等. $\text{GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ 玻璃的三阶非线性研究[J].硅酸盐通报,2008(03):466-470+480.
- [14] ANDRIESH A, IOVU M. Diffraction and luminescent structures based on chalcogenide glasses and polymers[J]. *Physica Status Solidi*, 2009, **246**(8): 1862-1865.
- [15] GUO Xia-rui, YANG De-xing, ZHAO Jian-lin, *et al.* Bending loss properties of photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1817-1820.
郭夏锐,杨德兴,赵建林,等.光子晶体光纤弯曲损耗特性研究[J].光子学报,2007, **36**(10):1817-1820.
- [16] CHERIF R, SALEM A B, ZGHAL M, *et al.* Highly nonlinear As_2Se_3 -based chalcogenide photonic crystal fiber for midinfrared supercontinuum generation [J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(9): 095002-095002-6.
- [17] SHAW L, THIELEN P, KUNG F, *et al.* IR supercontinuum generation in As-Se photonic crystal fiber [C]. Adv. Solid State Lasers (ASSL), 2005, Seattle, WA.
- [18] HU J, MENYUK C R, SHAW L B, *et al.* Maximizing the bandwidth of supercontinuum generation in As_2Se_3 chalcogenide fibers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(7): 6722-6739.
- [19] HU J, MENYUK C R, SHAW L B, *et al.* Computational study of $3\text{-}5 \mu\text{m}$ source created by using supercontinuum generation in As_2S_3 chalcogenide fibers with a pump at $2 \mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(17): 2907-2909.
- [20] GAO W, EL AMRAOUI M, LIAO M, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in a suspended-core As_2S_3 chalcogenide microstructured optical fiber[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(8): 9573-9583.
- [21] TROLES J, BRILLAND L, SMEKTALA F, *et al.* Chalcogenide photonic crystal fibers for near and middle

- infrared applications [C]. Transparent Optical Networks, 2007. ICTON'07. 9th International Conference on IEEE, 2007, 2: 297-300.
- [22] YUAN Jin-hui, HOU Lan-tian, ZHOU Gui-yao, *et al.* Preparation and experiment of high nonlinear flattened dispersion photonic crystal fiber[J]. *Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(8): 1007-1010.
苑金辉, 侯蓝田, 周桂耀, 等. 平坦色散高非线性光子晶体光纤的制备与实验[J]. *光电子 • 激光*, 2008, **19**(8): 1007-1010.
- [23] MENG Jia, HOU Lan-tian, ZHOU Gui-yao, *et al.* Preparation and research of small core refractive index guided photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(9): 1350-1354.
孟佳, 侯蓝田, 周桂耀, 等. 小芯径折射率引导型光子晶体光纤的制备和研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1350-1354.
- [24] WU Ming, LIU Hai-rong, HUANG De-xiu. Dispersion property in highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 539-542.
吴铭, 刘海荣, 黄德修. 高非线性光子晶体光纤色散特性的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 539-542.
- [25] GUAN Shou-hua, YU Qing-xu, LIU Jia-hong. Study on photonic crystal fiber dispersion control method[J]. *Study on Optical Communications*, 2011, **37**(6): 44.
关寿华, 于清旭, 刘佳宏. 光子晶体光纤色散调控方法的研究[J]. *光通信研究*, 2011, **37**(6): 44.
- [26] YANG Wang-xi. The theory design of communication band near-zero flattened dispersion photonic crystal fiber [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
杨旺喜. 通信波段近零平坦色散光子晶体光纤的理论设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- [27] DU Hai-long, DING Chun-feng, ZHEN Yi. Numerical study on the loss properties of photonic crystal fibers[J]. *Study on Optical Communications*, 2013, **39**(3): 39-40.
杜海龙, 丁春峰, 郑义. 光子晶体光纤损耗特性的数值研究[J]. *光通信研究*, 2013, **39**(3): 39-40.