

用于产生超连续谱的硫系光子晶体光纤的色散特性

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 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, 广东 广州 510275)

摘要: 光子晶体光纤具备的无截止单模、模场面积可调和色散可控的特性, 使其在超连续谱的产生中具有独特的优势。超连续谱的产生条件之一, 是所使用的光纤须具有高的非线性, 而硫系玻璃非线性系数极高, 因此利用硫系玻璃光子晶体光纤产生超连续谱的研究备受关注。采用熔融-淬冷法制备 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_{12}\text{S}_{65}$ 硫系玻璃, 并以此为基质设计了用于超连续谱产生的高非线性光子晶体光纤。采用多极法分析光纤孔间距 Λ 、孔径比 d/Λ 等对光纤的色散零点位移、色散平坦调控、损耗及模场面积的影响, 最终得到当 $\Lambda=2\ \mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.43$ 时, 可获得 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ 平坦色散的高非线性光子晶体光纤结构。

关键词: 超连续谱; 硫系玻璃; 光子晶体光纤; 色散特性

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1150-06

Dispersion properties of chalcogenide glass photonic crystal fiber for mid-IR supercontinuum spectrum generation

Cao Fengzhen¹, Zhang Peiqing^{1,2}, Dai Shixun¹, Wang Xunsi¹, Xu Tiefeng¹, Nie Qiu Hua¹

(1. Infrared Materials and Devices Laboratory of Ningbo University, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

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

Abstract: Photonic crystal fibers own the properties of endless single-mode, adjustable mode area and controlled dispersion which make it particularly suitable to achieve supercontinuum spectrum generation. One necessary condition of supercontinuum spectrum generation is that the used media has high nonlinear coefficient. Chalcogenide glass possesses the property of very high nonlinear, so using chalcogenide glass photonic crystal fiber to generate supercontinuum spectrum has attracted widespread attention. In this work, $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_{12}\text{S}_{65}$ chalcogenide glass was fabricated using melt-quenching method and measured to have high nonlinear refractive index. Chalcogenide glass photonic crystal fibers used for mid-IR supercontinuum spectrum generation was designed and studied with multi-polar method. By controlling the

收稿日期: 2013-08-11; 修订日期: 2013-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(61177087); 国家科技部重大国际合作项目(2001DFA12040);

教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-10-0976); 浙江省杰出青年基金(R1101263);

浙江省自然科学基金项目(LQ12F05004); 宁波市新型光电功能材料及器件创新团队项目(2009B21007);

宁波市自然科学基金(2012A610116); 光电材料与技术国家重点实验室开放基金; 宁波大学王宽诚幸福基金

作者简介: 曹凤珍(1989-), 女, 硕士生, 主要从事红外硫系玻璃光纤非线性方面的研究。Email: cfz229@163.com

导师简介: 聂秋华(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信与光纤材料等方面的研究。Email: nieqiu hua@nbu.edu.cn

hole spacing Λ and the aperture ratio d/Λ , the dispersion, loss and mode area optimized. Finally, a flattened dispersion photonic crystal fiber in the range 2–4 μm was obtained, with $\Lambda=2 \mu\text{m}$ and $d/\Lambda=0.43$.

Key words: supercontinuum spectrum; chalcogenide glass; photonic crystal fiber; dispersion characteristics

0 引言

超连续谱(Supercontinuum Spectrum, SC)是超强超短脉冲通过非线性介质时出现光谱展宽的现象^[1]。超连续谱对于非线性光学中超短脉冲的产生、光谱分析、光学相干层析、光计量学、光通信、光学频率梳等许多方面都有非常重要的意义^[2–4],此外,超连续谱在超短脉冲压缩、激光光谱学和传感技术方面也有很大的应用潜力,成为近年来研究的热点^[5–6]。

超连续谱的产生源自脉冲激光在非线性光纤中的自相位调制,交叉相位调制,受激拉曼散射和四波混频等非线性效应与光纤的群速度色散的共同作用,其中自相位调制和群速度色散起着主导作用^[7–8]。因此高非线性的光纤介质和合理的群速度色散成为获取超连续谱的关键。

硫系玻璃作为一种新型的红外光学玻璃,具有极高的非线性系数($n_2=2\sim 20\times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$,是石英材料的100~1000倍)和优良的红外透过性(透过范围可从0.5~1 μm 到12~25 μm)^[9]。利用硫系光子晶体光纤产生超连续谱可显著降低泵浦光的功率和光纤的长度,在微纳光器件及集成光路中具有巨大的应用前景^[10–11]。硫系光子晶体光纤具备的无截止单模、模场面积可调和色散可控的特性,使其在超连续谱的产生中具有独特的优势^[12–13]。

目前用于产生超连续谱的光纤主要有色散位移光纤,色散平坦光纤和色散渐减型光纤等。其中色散平坦型光纤产生超连续谱具有光纤长度短、抽运脉冲的功率较低、抽运脉冲宽度宽及超连续谱平坦度好、稳定性高等优点,并且其光纤结构通常比色散渐减型光纤简单,易于实验制备,因而获得了广泛的研究和应用^[8,14]。在文中,制备了高质量 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_{12}\text{S}_{65}$ 硫系玻璃,实验测试显示其具有良好的红外透过特性和极高的非线性系数^[15–16]。以此为基质材料,笔者设计了一种多层空气孔排列硫系光子晶体光纤,研究了

不同包层结构下光子晶体光纤的色散,模场面积及损耗特性。通过优化光纤包层空气孔结构,笔者获得了可用于2.5 μm 飞秒激光的色散位移光纤和色散平坦型硫系光子晶体光纤^[17]。

1 硫系玻璃的材料特性

文中使用熔融–淬冷法制备了 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_{12}\text{S}_{65}$ 硫系玻璃。傅里叶红外光谱显示其中远红外具有良好的透过性能。利用中心波长800 nm的飞秒激光Z-扫描装置,测试了其非线性光学特性,其非线性折射率 $n_2=5.82\pm 0.3\times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{W}$ (实验测量误差约10%),远高于传统的石英玻璃^[16]。利用棱镜耦合仪测量了此玻璃在不同波长下的折射率分布,并利用Sellmeier公式(即公式(1))拟合了其折射率随波长变化的曲线^[18]:

$$n^2=A+\frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2-C_1}+\frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2-C_2}+\frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2-C_3} \quad (1)$$

Sellmeier公式中的相关系数,如表1所示。

表1 Sellmeier公式拟合系数

Tab.1 Sellmeier formula fitting coefficient

A	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃
1	0.041 5	0.072 2	4.004 3	0.096 8	174.050 9	0.055 8

图1(a)中显示了 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_{12}\text{S}_{65}$ 玻璃的折射率变化曲线。从图1(b)可以看出,文中制备的 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_{12}\text{S}_{65}$ 硫系玻璃的材料色散零点在5 μm 附近。材料色散可由公式(2)得到:

$$D_m=-\frac{\lambda}{c}\frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2} \quad (2)$$

式中: D_m 为材料色散; λ 为波长; c 为真空中的光速; n 为纤芯材料折射率。为了获得可适用于2.5 μm 钛宝石飞秒激光的高非线性光纤,用于产生中红外波段的超连续谱,笔者利用特殊结构多层空气孔光子晶体光纤的波导色散将光纤的总色散零点移动至2.5 μm 附近,并通过优化孔间距 Λ 和孔径比 d/Λ 等参数实现其色散平坦特性。

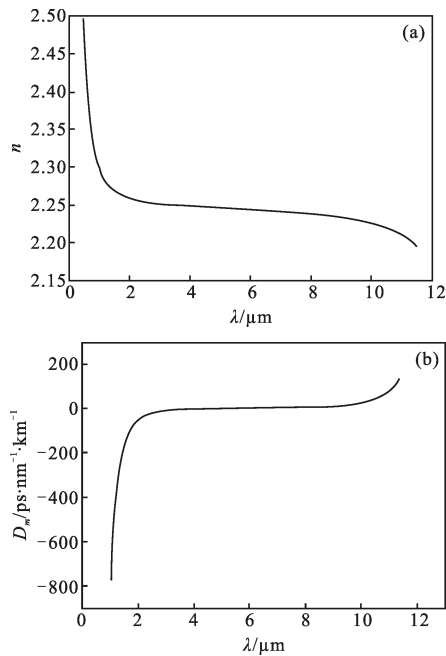


图 1 波长-折射率曲线图和波长-材料色散曲线图

Fig.1 Wavelength-refractive index graph and wavelength-material dispersion curves

2 硫系光子晶体光纤色散特性分析

设计的多层空气孔光子晶体光纤结构如图 2 所示,该光纤包层为三层空气孔,结构简单,易于制备。其中 Λ 为包层空气孔间距, d 为空气孔直径。由图 1(b) 中可知, $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_{12}\text{S}_{65}$ 硫系玻璃在小于 $3\ \mu\text{m}$ 的短波区域具有很大的负色散值,且色散斜率较大,不利于实现低且平坦色散特性。在优化过程中,通过调节空气孔间距和占空比来控制光纤的色散曲线,并实时监控光纤的限制损耗和模场面积,以求获得具有较好色散特性,且模场面积和损耗均较小的高非线性硫系光子晶体光纤。

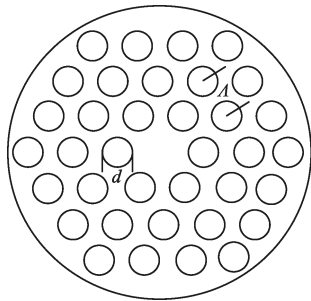


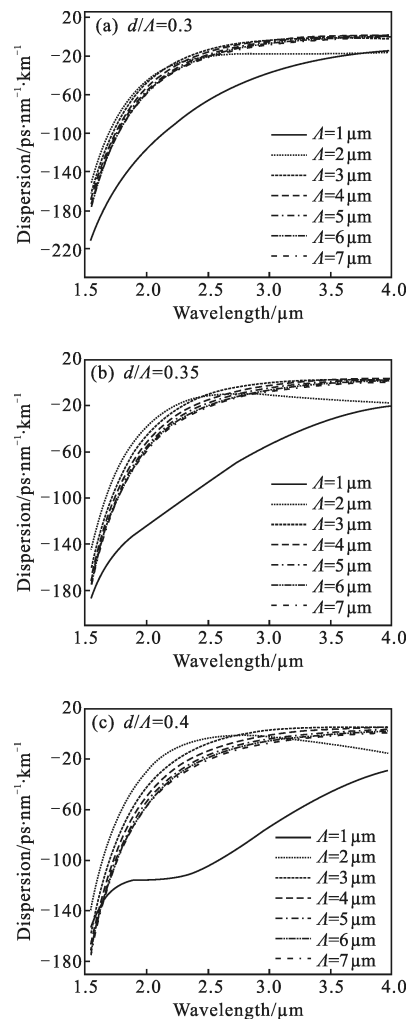
图 2 设计的光子晶体光纤横截面示意图

Fig.2 Cross-sectional schematic view of photonic crystal fiber

2.1 色散零点位移

为了调整硫系光子晶体光纤的色散零点,分析

了不同占空比条件下,硫系光子晶体光纤的色散随空气孔间距的变化关系。图 3(a)~(c) 分别为占空比 $d/\Lambda=0.3$ 、 $d/\Lambda=0.35$ 、 $d/\Lambda=0.4$ 时, Λ 从 $1\ \mu\text{m}$ 增加到 $7\ \mu\text{m}$ 时光纤的色散曲线。从图中可以看出,在小空气孔间距情况下,如 Λ 为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 时,光纤的色散在整个计算的波长范围内均为负值,即表现为正常色散。随着 Λ 的增大,色散曲线由负变为正,光纤的色散也由正常色散表现为反常色散,且零色散点明显向长波长方向移动。在计算的波长范围内,硫系玻璃的材料色散均为负值,模拟发现当孔间距较小时,光纤具有较大的波导色散值,更利于将零色散点向短波长方向移动。从图 3 的计算结果可以看出,当 $\Lambda=2\ \mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda=0.4$ 时色散曲线在 $2.5\ \mu\text{m}$ 波长处最接近零色散点。

图 3 光纤中空气孔占空比 d/Λ 分别为 0.3、0.35 和 0.4 时,孔间距 Λ 对色散特性的影响Fig.3 Effect of Λ on dispersion, when d/Λ is 0.3, 0.35 and 0.4

2.2 色散平坦调控

为获得具有平坦色散特性的光子晶体光纤,笔者进一步细化了不同的空气孔占空比对光纤色散平坦度的影响。图4(a)~(c)分别为孔间距 $\Lambda=2\mu\text{m}$ 、 $\Lambda=3\mu\text{m}$ 、 $\Lambda=4\mu\text{m}$ 时,不同空气孔占空比 d/Λ 对色散特

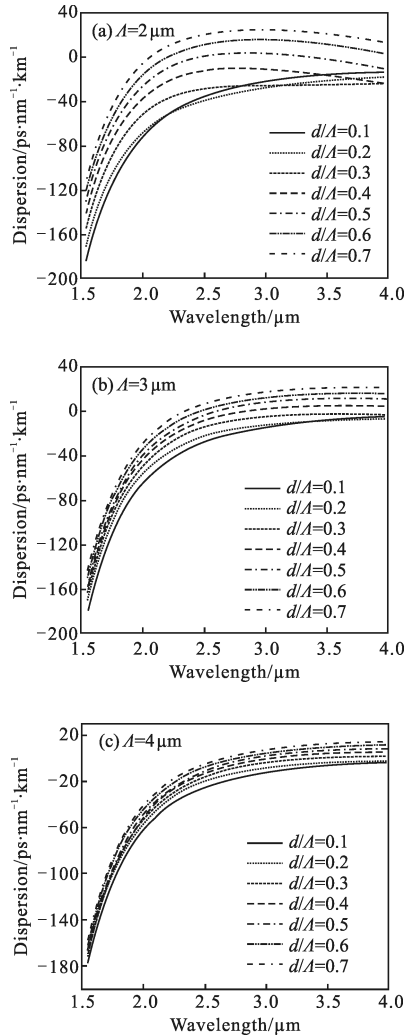


图4 孔间距 Λ 分别为 $2\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 和 $4\mu\text{m}$ 时,孔径比 d/Λ 对色散特性的影响

Fig.4 Effect of d/Λ on dispersion, when Λ is $2\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$ and $4\mu\text{m}$

性的影响。理论计算和实验研究证明,小的占空比容易产生大的限制损耗,大的占空比将破坏光子晶体光纤的无截止单模特性,同时增加光纤的制备难度。但是,为了全面显示占空比对光纤色散特性的影响,在设计光纤时,仍选择占空比具有较大变化范围。将 d/Λ 从0.1逐渐增加到0.7,从图4中可以看出,当 d/Λ 较小时,如 $d/\Lambda=0.1\sim 0.2$ 时,各种孔间距下光纤无零色散点出现。逐渐增大 d/Λ 的值,光纤色散则由正

常色散转为反常色散,零色散点明显向短波长方向移动,且孔间距 Λ 越大,色散曲线越密集,即色散越平坦。然而,由2.1节分析可知,大的孔间距 Λ 将导致零色散点将向长波长方向移动。因此,为了实现光纤在 $2.5\mu\text{m}$ 附近零色散且色散较平坦特性,必需设计恰当的孔间距 Λ 和占空比 d/Λ 。由图4可知,当 d/Λ 处于0.4和0.5之间, Λ 在 $2\mu\text{m}$ 附近时,最有希望达到设计要求,且由图4(a)可知,此时光纤在 $2\sim 4\mu\text{m}$ 范围内,色散值较小且比较平坦(色散值在 $-10\sim 10\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 之间),利于超连续谱的产生。

为了获得 $2.5\mu\text{m}$ 附近色散值更低且平坦的最优化光纤结构,在孔间距 $\Lambda=2\mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.4\sim 0.45$ 之间进一步调节光纤结构参数。图5为最终获得的优化色散曲线,对应光纤的结构参数 $\Lambda=2\mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.43$ 。由图5可见,此时光纤在 $2.5\mu\text{m}$ 和 $3.25\mu\text{m}$ 处具有两个零色散点,在 $2.5\sim 3.25\mu\text{m}$ 之间表现为小的反常色散,且色散值均小于 $4\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

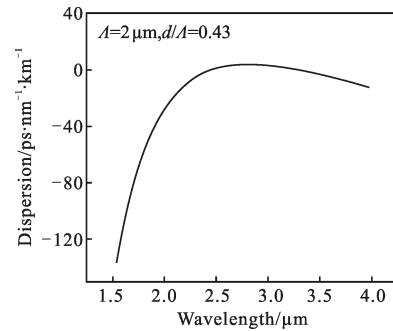


图5 孔间距 $\Lambda=2\mu\text{m}$,孔径比 $d/\Lambda=0.43$ 时对色散特性的影响

Fig.5 Effect to dispersion when $\Lambda=2\mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.43$

2.3 损耗及模场面积分析

损耗和模场面积是影响光纤非线性应用的两个重要参数。在优化光纤色散特性的同时,控制光纤的限制损耗和模场面积在较为合理的范围。在图6和图7中,分别分析了 $2.5\mu\text{m}$ 时,占空比 d/Λ 和孔间距 Λ 对光纤的模场面积和限制损耗的影响。从图6(a)可看到,对于确定的孔间距 $\Lambda=2\mu\text{m}$,光纤的限制损耗和模场面积随着占空比 d/Λ 的增加逐渐减小。当 $d/\Lambda=0.43$ 时,限制损耗接近于零;由图6(b)可知,此时的有效模场面积也非常小,又由公式(3)

$$\gamma = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \quad (3)$$

可得,其非线性系数非常高。其中 γ 为非线性系数; n_2 为非线性折射率; A_{eff} 为纤芯有效模场面积。虽然

占空比的继续增大能带来更小的模场面积, 但会破坏光子晶体光纤的无截止单模特性及色散平坦特性, 同时考虑到光纤的制备难度, 因此, 选择最优的占空比 $d/\Lambda=0.43$ 。

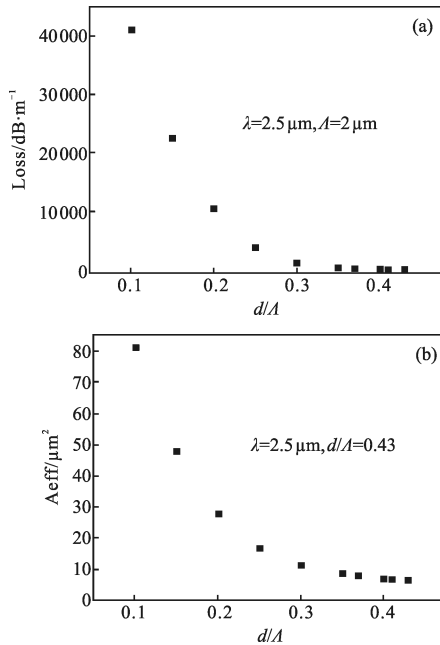


图 6 孔径比-损耗曲线图和孔径比-有效模场面积曲线图

Fig.6 Aperture ratio-loss curve and aperture ratio-effective mode area graph

在图 7 中, 分析了 $2.5 \mu\text{m}$ 处光纤的限制损耗和

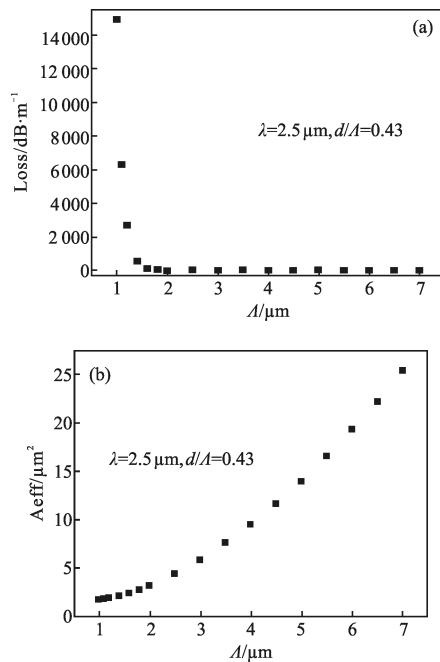


图 7 孔间距-损耗曲线图和孔间距-有效模场面积曲线图

Fig.7 Hole pitch-loss curve and hole pitch-effective mode area graph

有效模场面积随孔间距 Λ 的变化关系。固定占空比 $d/\Lambda=0.43$ 。模拟发现限制损耗随孔间距 Λ 的增大而减小, 然而光纤的模场面积随着孔间距 Λ 的增加迅速增大。综合平衡光纤的色散平坦, 限制损耗和模场面积, 选择光纤的孔间距 $\Lambda=2.0 \mu\text{m}$ 。此时光纤不仅在 $2.5 \mu\text{m}$ 附近具有宽带色散平坦特性, 且由图 7(b) 可知, 光纤具有很小的场面积 ($<5 \mu\text{m}^2$)。

3 结论

文中利用熔融淬冷法制备 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_{12}\text{S}_{65}$ 硫系玻璃, 飞秒激光 Z-扫描显示其非线性折射率 n_2 高达 $5.82 \times 10^{-13} \text{cm}^2/\text{W}$ 。以此为基质材料, 设计了可用于 $2.5 \mu\text{m}$ 飞秒激光的色散位移和色散平坦型硫系光子晶体光纤。利用多极法研究了孔间距 Λ 和孔径比 d/Λ 对其光纤色散特性, 限制损耗和模场面积的影响。研究发现, 随着 Λ 的增大, 光纤零色散点向长波长方向移动; 随着 d/Λ 的增大, 光纤零色散点向短波长方向移动, 且色散曲线更趋于平坦。通过优化结构参量, 最终得到当 $\Lambda=2 \mu\text{m}, d/\Lambda=0.43$ 时, 可实现 $2 \sim 4 \mu\text{m}$ 的平坦色散。

参考文献:

- [1] Chen Bo. Using femtosecond pulses to produce supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Scientific Advisory (Decision Management)*, 2008, 23(12): 63. (in Chinese)
陈波. 利用飞秒脉冲在光子晶体光纤中产生超连续谱[J]. 科学咨询(决策管理), 2008, 23(12): 63.
- [2] Hartl I, Li X, Chudoba C, et al. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(9): 608-610.
- [3] Han Hainian, Zhang Wei, Wang Peng, et al. Precise control of femtosecond Ti: sapphire laser frequency comb [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(5): 2760-2764. (in Chinese)
韩海年, 张伟, 王鹏, 等. 飞秒钛宝石光学频率梳的精密锁定[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2760-2764.
- [4] Li Shuguang, Yao Yanyan, Fu Bo, et al. Development and application of supercontinuum generation in photonic crystal fibers[J]. *Physics*, 2010, 39(10): 682-690. (in Chinese)
李曙光, 姚艳艳, 付博, 等. 光子晶体光纤中超连续谱的研究进展与应用[J]. 物理, 2010, 39(10): 682-690.
- [5] Schenkel B, Paschotta R, Keller U. Pulse compression with

- supercontinuum generation in microstructure fibers [J]. *Josa B*, 2005, 22(3): 687–693.
- [6] S Dmeyer T, Brunner F, Innerhofer E, et al. Nonlinear femtosecond pulse compression at high average power levels by use of a large-mode-area holey fiber [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(20): 1951–1953.
- [7] Alfano R R. *The Supercontinuum Laser Source* [M]. New York: Springer-Verlag New York Inc, 1989: 458.
- [8] Chen Yongzhu, Li Yuzhong, Xu Wencheng. Research on flat ultra-wideband supercontinuum generated in dispersion-flattened decreasing fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(12): 7693–7698. (in Chinese)
陈泳竹, 李玉忠, 徐文成. 色散平坦渐减光纤产生平坦超宽超连续谱的特性研究 [J]. *物理学报*, 2008, 57(12): 7693–7698.
- [9] 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.
- [10] Coen S, Chau A H L, Leonhardt R, et al. White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(17): 1356–1358.
- [11] Li Xiaoqing, Zhang Shumin, Li Dan, et al. Experimental and numerical study of supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9): 1805–1809. (in Chinese)
李晓青, 张书敏, 李丹, 等. 光子晶体光纤中超连续谱产生的理论与实验研究 [J]. *光子学报*, 2008, 37(9): 1805–1809.
- [12] Andriesh A, Iovu M. Diffraction and luminescent structures based on chalcogenide glasses and polymers [J]. *Physica Status Solidi(b)*, 2009, 246(8): 1862–1865.
- [13] Guo Xiarui, Yang Dexing, Zhao Jianlin, et al. Experimental investigation on the bending loss properties of photonic crystal fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(10): 1817–1820. (in Chinese)
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.
- [14] Xu Yongzhao, Xu Wencheng, Yu Bingtao, et al. Generation of supercontinuum spectrum in a dispersion-flattened and decreasing fiber due to cross-phase modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6): 772–776. (in Chinese)
徐永钊, 徐文成, 于丙涛, 等. 色散平坦渐减光纤中超连续谱的产生 [J]. *光学学报*, 2004, 24(6): 772–776.
- [15] Kohoutek T, Yan X, Shiosaka T W, et al. Enhanced Raman gain of Ge–Ga–Sb–S chalcogenide glass for highly nonlinear microstructured optical fibers [J]. *Josab*, 2011, 28(9): 2284–2290.
- [16] Zhang Hua, Nie Qihua, Dai Shixun, et al. Investigation of nonlinear optical properties of GeS₂–Sb₂S₃ chalcogenide glasses [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2008(3): 466–470, 480. (in Chinese)
张花, 聂秋华, 戴世勋, 等. GeS₂–Sb₂S₃ 玻璃的三阶非线性研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2008(3): 466–470, 480.
- [17] Sanghera J S, Shaw L B, Pureza P, et al. Nonlinear properties of chalcogenide glass fibers [J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2010, 1(3): 296–308.
- [18] Tatian B. Fitting refractive-index data with the Sellmeier dispersion formula [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(24): 4477–4485.