

# 中红外双零色散全固硫系微结构光纤

陈亚丽 杨伟兵

漯河职业技术学院电气电子工程系, 河南 漯河 462002

**摘要** 基于  $\text{As}_2\text{Se}_3$  和  $\text{As}_2\text{S}_5$  两种硫系玻璃,设计了一种结构简单、易于拉制,且在中红外具有双零色散波长的全固微结构光纤。利用有限时域差分法对该光纤的有效折射率、有效模面积、非线性系数、色散系数及群速度进行了数值分析,结果表明,随着  $\text{As}_2\text{S}_5$  棒直径和棒间距的变化,中红外区域的 2 个零色散波长位置在很大范围内可调,尤其是第 2 个零色散波长最大可达 7388 nm,零色散波长间距可以从 2706 nm 连续调节至 3773 nm,为中红外非线性光纤光学及其应用提供了一定的理论指导。

**关键词** 光纤光学;微结构光纤;硫系玻璃;中红外

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.060605

## All-Solid Chalcogenide Microstructured Optical Fiber with Two Zero-Dispersion Mid-Infrared Wavelengths

Chen Yali Yang Weibing

*Department of Electrical and Electronic Engineering, Luohe Vocational Technology College,  
Luohe, Henan 462002, China*

**Abstract** Based on  $\text{As}_2\text{Se}_3$  and  $\text{As}_2\text{S}_5$  glasses, an all-solid microstructured optical fiber with simple and easily drawing structure, and two zero-dispersion wavelengths in the mid-infrared is designed. Its effective refractive index, effective mode area, nonlinear coefficient, dispersion and group velocity are numerically simulated by the finite-difference time-domain method. The result shows that dynamic adjustment of the two zero-dispersion wavelengths can be realized in the mid-infrared, and the second zero-dispersion wavelength can shift to the maximum wavelength of 7388 nm. The space between the two zero-dispersion wavelengths can continually be changed from 2706 nm to 3773 nm. This work provides a theoretical guidance for the application of nonlinear fiber optics.

**Key words** fiber optics; microstructured optical fibers; chalcogenide glasses; mid-infrared

**OCIS codes** 060.2310; 060.2280; 060.2290

## 1 引言

微结构光纤(MOF)亦称光子晶体光纤(PCF)<sup>[1-3]</sup>,沿轴向均匀排列着微米量级的空气孔。该光纤最早是由 Russell 等<sup>[4]</sup>于 1996 年在英国 Bath 大学成功拉制。根据其导光机理可分为折射率引导型 MOF 和光子带隙型 MOF。相比于传统的光纤,MOF 包层中的空气孔排列及大小有很大的控制余地,因而其具有独特的光学特性,除了可灵活地调节光纤的群速度色散、色散斜率和非线性系数等参数外,还具有无限单模传输、高双折射、大模场和高非线性等特性。MOF 现已广泛应用于非线性器件、传感监测和信号传输等方面<sup>[5-10]</sup>。一般的硅基质光纤只存在 1 个位于 1300 nm 附近的零色散波长(ZDW),而 MOF 通过灵活设计参数,可以得到多个零色散波长<sup>[11-14]</sup>。其中具有双零色散波长的 MOF,与普通的单零色散波长 MOF 相比,具有很多优势,例如,在产生超连续光谱方面<sup>[15]</sup>,由于第 2 个零色散波长可以有效地限制拉曼孤子的红移,因而可以更好地控制超连续谱的演化

收稿日期: 2016-01-13; 收到修改稿日期: 2016-02-22; 网络出版日期: 2016-05-05

作者简介: 陈亚丽(1981—),女,硕士,讲师,主要从事特种光纤和电磁功能材料等方面的研究。

E-mail: cht108324@sohu.com

过程,实现可控的超连续光谱输出。此外,双零色散波长 MOF 还可以应用于光学相干断层成像和群速度测量等相关领域<sup>[16]</sup>。国内外很多课题组已设计并模拟了不同结构的双零色散波长 MOF<sup>[12-13]</sup>,并将其应用在孤子对产生、波长转换和超连续产生等方面<sup>[17-18]</sup>。然而,大多数双零色散波长的 MOF 结构复杂且以硅作基质,不仅拉制困难,而且容易受硅基质传输窗口限制(最大工作波长位于 2.0  $\mu\text{m}$  附近),因此制作结构简单、易控制并且支持中红外光传输的双零色散波长的 MOF 成为当务之急。另一方面,基于 S、Se 和 As 等元素制作的硫系 MOF 因具有高非线性折射率和很宽的中远红外传输窗口等优良特性,近年来备受国内外关注<sup>[19-21]</sup>,现已在结构设计、光纤制备及可控色散特性等方面取得了重大进展,并成功将其应用于非线性光纤光学、中红外能量传输、中红外光纤激光器及传感检测等相关领域<sup>[22-24]</sup>。

基于上述情况,本文采用  $\text{As}_2\text{Se}_3$  和  $\text{As}_2\text{S}_5$  两种硫系玻璃,设计了一种在中红外具有双零色散波长的全固 MOF,以高折射率材料( $\text{As}_2\text{Se}_3$ )作为基底,4 个低折射率材料( $\text{As}_2\text{S}_5$ )固体棒以正方形结构排布在包层区域。该 MOF 结构简单容易拉制,而且可以通过调整棒间距和棒直径,来获得不同的光学特性。利用有限时域差分法(FDTD)数值模拟分析了该 MOF 的有效折射率、非线性系数、色散和群速度等特性,为硫系 MOF 的制备及非线性光纤光学特性的研究提供了理论指导。

## 2 理论模型

采用基于 FDTD 方法编写的 MODE SOLUTIONS 软件对全固硫系 MOF 进行数值模拟分析。FDTD 方法由 Yee<sup>[25]</sup>在 1966 年创立,主要把麦克斯韦方程在空间和时间上采用一定的差分格式分离化,用差分方程代替一阶偏微分方程,通过求解差分方程组从而得出各个单元的场值,现已广泛应用于电磁场的计算。

通常来说,光纤的色散系数由两部分组成,即材料色散  $D_m$  和波导色散  $D_w$ ,具体表达式为

$$D_{\text{Total}} = D_m(\lambda) + D_w(\lambda). \quad (1)$$

与传统光纤相比,MOF 包层结构灵活可调,能够在波导色散控制方面发挥作用,通过合理设计就可以实现可控的色散特性。材料色散结合 Sellmerier 公式表示为

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

式中  $\lambda$  是波长, $c=3 \times 10^8$  m/s 是光在真空中的传播速率, $n$  是通过 Sellmerier 系数计算得到的材料折射率。波导色散可以由基模的有效折射率计算,即

$$D_w(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{\partial \lambda^2}, \quad (3)$$

式中  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  是基模的有效折射率的实部,通过基模的虚部  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  可以得到模式的限制损耗:

$$\alpha = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6, \quad (4)$$

式中  $\lambda$  的单位为  $\mu\text{m}$ ,通过求解以下方程可以得到基模的有效模面积  $A_{\text{eff}}$  和非线性系数  $\gamma$ :

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left( \iint_S |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint_S |E|^4 dx dy}, \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (6)$$

式中  $E$  为 MOF 端面上的横向电场分布, $S$  为光纤的横截面积。从(6)式可以看出,有效模面积与光纤非线性系数成反比。

## 3 结构设计及数值模拟

硫化砷与硒化砷的软化温度相近,分别约为 184  $^\circ\text{C}$  和 196  $^\circ\text{C}$ ,并且两者有很好的兼容性,所以文中基于这两种玻璃组分设计了一种可以制备的全固硫系 MOF<sup>[22]</sup>。其结构如图 1(a)所示,图中灰色为  $\text{As}_2\text{Se}_3$  基底,包层中 4 个白色孔为空气孔,黑色孔为  $\text{As}_2\text{S}_5$  棒,  $\text{As}_2\text{S}_5$  棒代替空气孔即可得到全固硫系 MOF。当波

长 $\lambda=5\ \mu\text{m}$ 时,  $\text{As}_2\text{Se}_3$  基底和  $\text{As}_2\text{S}_5$  棒材料的折射率分别是 2.73 和 2.23。包层棒间距(孔间距)为  $\Lambda$ , 棒直径(空气孔直径)为  $D$ 。在  $\Lambda=6.4\ \mu\text{m}$  和  $D=6\ \mu\text{m}$  的情况下, 对比计算了空气孔结构和全固结构硫系 MOF 的色散特性如图 1(b)所示。从图中可以看出在波长 2000~9000 nm 范围内, 空气孔硫系 MOF 只有 1 个位于 2770 nm 的零色散波长, 而全固硫系 MOF 有 2 个零色散波长, 分别是 3360 nm 和 6160 nm, 并且其色散曲线变化幅度小, 接近于零。全固硫系 MOF 具有的色散优势, 有利于中红外宽带超连续光谱的产生和控制, 并且由于其可以在第 2 个零色散波长 6160 nm 以外产生中红外色散波, 因而可用作中红外可调谐光源。

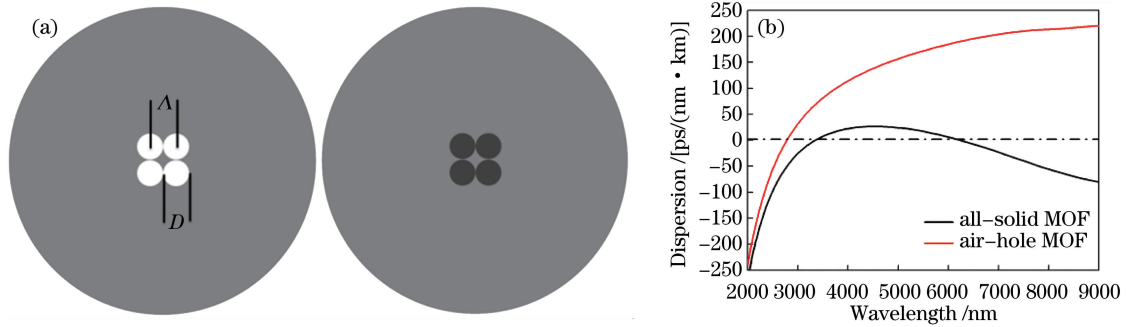


图 1 (a) 空气孔结构和全固硫系 MOFs 的断面图; (b) 空气孔结构和全固硫系 MOF 的色散曲线  
Fig. 1 (a) Sectional views of a chalcogenide air-hole MOF and an all-solid chalcogenide MOF; (b) chromatic dispersion curves of a chalcogenide air-hole MOF and an all-solid chalcogenide MOF

在波长 2000~9000 nm 范围内对全固硫系 MOF 的基模有效折射率( $n_{\text{eff}}$ )、有效模面积、非线性系数和限制损耗随棒间距  $\Lambda$  的变化规律进行了数值模拟分析, 结果如图 2 所示。 $\text{As}_2\text{S}_5$  棒直径  $D=6\ \mu\text{m}$  固定不变, 棒间距  $\Lambda$  的变化范围为 6.4~6.9  $\mu\text{m}$ 。图 2(a)为基模的有效折射率随  $\Lambda$  的变化规律, 可以看出, 有效折射率随  $\Lambda$  的增加逐渐增加, 但是随着波长的增大而减少。图 2(b)为有效模面积随  $\Lambda$  的变化规律, 当  $\Lambda$  增加时, 纤芯直径增加, 有效模面积也随之增加。图 2(c)为光纤的非线性系数随  $\Lambda$  的变化规律, 随  $\Lambda$  的增加非线性系数减少, 与有效模面积呈相反的变化趋势。图 2(d)为光纤限制损耗随  $\Lambda$  的变化规律, 纵坐标以对数形式表示, 从而可以更直观形象地看出随  $\Lambda$  的增加, 限制损耗越来越大; 当  $\Lambda=6.4\ \mu\text{m}$  时, 限制损耗为

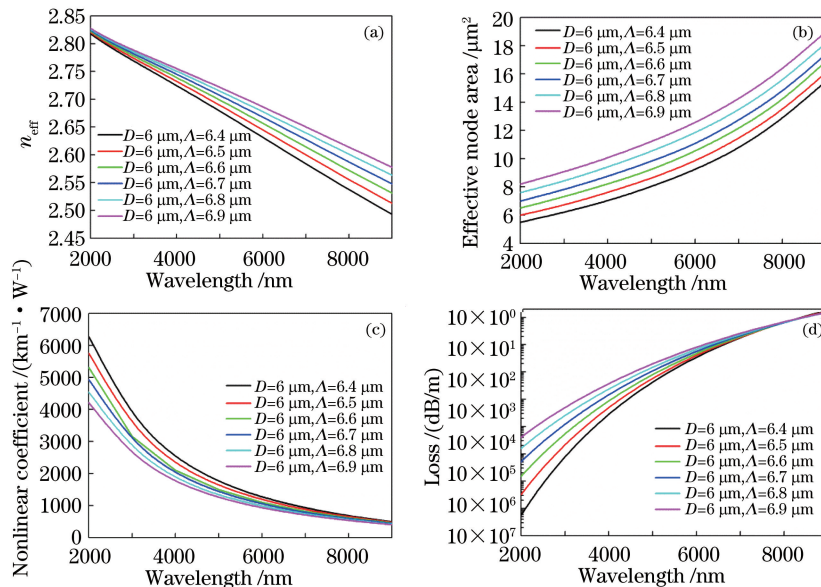


图 2  $D=6\ \mu\text{m}$  时, MOF 特性与  $\Lambda$  的变化关系。(a)有效折射率随  $\Lambda$  的变化规律; (b)有效模面积随  $\Lambda$  的变化规律;  
(c)非线性系数随  $\Lambda$  的变化规律; (d)限制损耗随  $\Lambda$  的变化规律。

Fig. 2 Properties of MOF in terms of  $\Lambda$  when  $D=6\ \mu\text{m}$ . (a) Effective refractive index varies with different  $\Lambda$  ;  
(b) effective mode area varies with different  $\Lambda$  ; (c) nonlinear coefficient varies with different  $\Lambda$  ;  
(d) confinement loss varies with different  $\Lambda$

6 dB/m所对应的波长为 7940 nm,充分证明了该光纤可以支持中红外传输。为了进一步说明限制损耗随波长变化关系,对比分析了波长在 2  $\mu\text{m}$  和 9  $\mu\text{m}$  时的基模模场分布如图 3 所示,可以直观看出相比于 2  $\mu\text{m}$ , 9  $\mu\text{m}$  时的基模模场更大,并有部分泄露到了  $\text{As}_2\text{S}_5$  棒内,因而损耗更高。

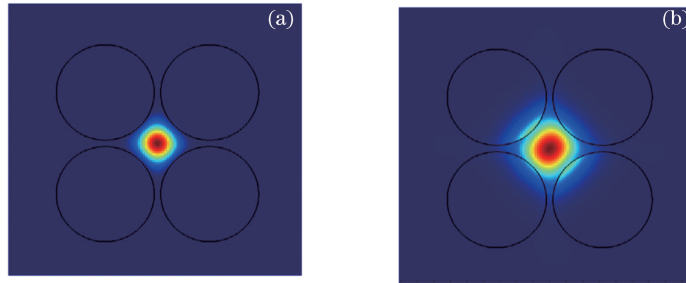


图 3 不同波长下的基模模场分布图。(a) 波长为 2  $\mu\text{m}$ ; (b) 波长为 9  $\mu\text{m}$

Fig. 3 Fundamental mode profiles under different wavelengths. (a)  $\lambda=2 \mu\text{m}$ ; (b)  $\lambda=9 \mu\text{m}$

图 4 显示在相同的情况下,色散系数和群速度曲线随  $\Lambda$  的变化规律。从图 4(a)可以看出,随  $\Lambda$  的增加 2 个零色散波长均发生红移,并且零色散点间距变大。图 4(b)更直观地显示出 2 个零色散波长的变化趋势,当  $\Lambda=6.4 \mu\text{m}$  时,2 个零色散波长分别是 3344 nm 和 6237 nm,当  $\Lambda=6.9 \mu\text{m}$  时,2 个零色散波长移动到 3615 nm 和 7388 nm,零色散点间距从 2893 nm 增加到 3773 nm。由此可见,该全固硫系 MOF 打破了传统硅光纤的局限,通过调节光纤结构参数便可以得到特定的零色散波长及零色散间距,从而实现对波长转换和超连续等非线性特性研究,尤其是对中红外的非线性特性研究提供了理论支持。图 4(c)为群速度色散随  $\Lambda$  增加的变化规律,根据图中曲线可以得到满足群速度匹配时对应的波长,能更好地分析由光孤子捕获的色散波的波长位置。

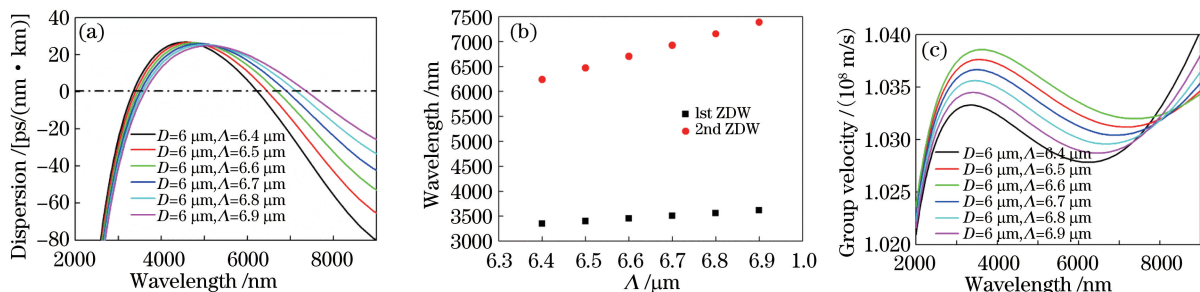


图 4 (a)  $D=6 \mu\text{m}$  时,色散系数随  $\Lambda$  的变化规律;(b)  $D=6 \mu\text{m}$  时 2 个零色散波长随  $\Lambda$  的变化规律;  
(c)  $D=6 \mu\text{m}$  时,群速度随  $\Lambda$  的变化规律。

Fig. 4 (a) Chromatic dispersion varies with different  $\Lambda$  at  $D=6 \mu\text{m}$ ; (b) two zero-dispersion wavelengths vary with different  $\Lambda$  at  $D=6 \mu\text{m}$ ; (c) group velocity varies with different  $\Lambda$  at  $D=6 \mu\text{m}$

另一方面,数值分析了基模有效折射率( $n_{\text{eff}}$ )、有效模面积、非线性系数和限制损耗随  $D$  增加的变化规律。波长范围仍为 2000~9000 nm, $\Lambda=6.4 \mu\text{m}$  固定不变, $D$  从 5.7  $\mu\text{m}$  增加至 6.2  $\mu\text{m}$ 。图 5(a)为基模的有效折射率随  $D$  的变化规律,可以看出,随着  $D$  的增加有效折射率逐渐减少,与图 2(a)相反,并且随波长的增大而减少。图 5(b)为有效模面积随  $D$  的变化规律,当  $D$  增加时,纤芯直径减少,有效模面积也随之减少。图 5(c)为非线性系数随  $D$  的变化规律,随  $D$  增加光纤非线性系数增加。图 5(d)为光纤限制损耗随  $D$  的变化规律,纵坐标以对数形式表示,可以看出在  $\Lambda$  保持不变, $D$  增加时,纤芯芯径变小,限制光的作用变强,限制损耗变小。在  $D=6.2 \mu\text{m}$ ,限制损耗为 6 dB/m 对应的波长为 8120 nm,相比于在参数  $D=6 \mu\text{m}$  和  $\Lambda=6.4 \mu\text{m}$  时,该参数下限制损耗更小,更有利于中红外超连续及非线性现象的产生。以上分析充分揭示了该全固硫系 MOF 的优越性及可行性,尤其是对限制损耗的分析,从理论上证实了该光纤能够支持中红外光传输,为下一步实际拉制、非线性特性研究及中红外传感检测提供了有益的理论导向。

图 6 为在相同情况下色散系数和群速度随  $D$  的变化规律曲线。从图 6(a)可以看出,随  $D$  增加光纤 2 个零色散波长均发生蓝移,并且零色散间距变小。图 6(b)显示了 2 个零色散波长的变化趋势,从图中可以看



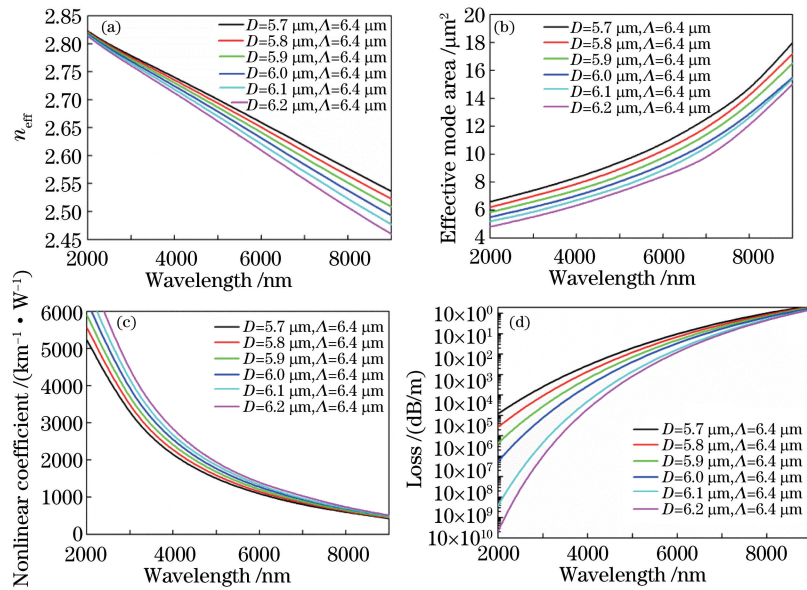


图 5  $\Lambda = 6.4 \mu\text{m}$  时, MOF 特性与  $D$  的变化关系。(a) 有效折射率随  $D$  的变化规律; (b) 有效模面积随  $D$  的变化规律; (c) 非线性系数随  $D$  的变化规律; (d) 限制损耗随  $D$  的变化规律。

Fig. 5 Properties of MOF varies with different  $D$  when  $\Lambda = 6.4 \mu\text{m}$ . (a) Effective refractive index with different  $D$ ; (b) effective mode area with different  $\Lambda$ ; (c) nonlinear coefficient with different  $D$ ; (d) confinement loss with different  $D$

出,当  $D = 5.7 \mu\text{m}$  时,2 个零色散波长分别是  $3478 \text{ nm}$  和  $6582 \text{ nm}$ ,当  $D = 6.2 \mu\text{m}$  时,2 个零色散波长分别移动到  $3259 \text{ nm}$  和  $5965 \text{ nm}$ ,零色散间距从  $3104 \text{ nm}$  减少到  $2706 \text{ nm}$ 。图 6(c) 是群速度色散的变化规律。通过分析可以看出,该全固体硫系 MOF 的 2 个零色散波长位置和距离可以随光纤结构参数改变可调,在不同的  $D$  和  $\Lambda$  下,零色散波长间距在  $2706 \sim 3773 \text{ nm}$  区间内连续可调,变化范围超过  $1000 \text{ nm}$ ,中红外的优势非常明显。同时,该光纤在中红外区域被反常色散区分割成 2 个正常色散区,可以产生丰富的相位匹配曲线,能有效地控制光孤子、色散波、四波混频以及超连续的产生,以满足不同的应用需要。

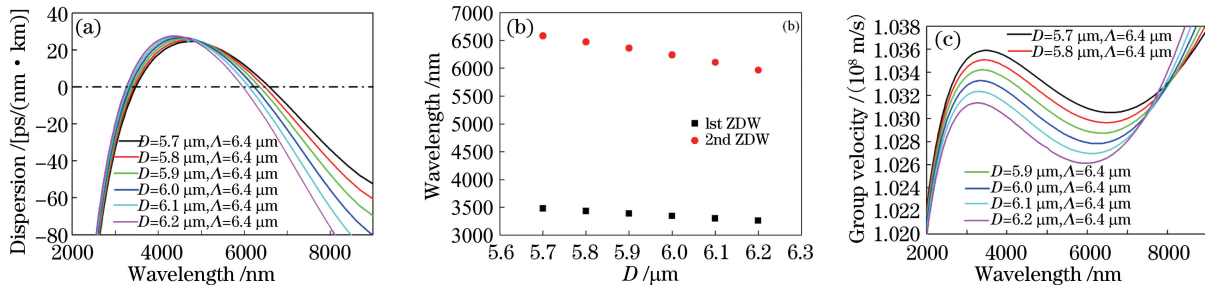


图 6 (a) 当  $\Lambda = 6.4 \mu\text{m}$  时,色散系数随  $D$  的变化规律; (b)  $\Lambda = 6.4 \mu\text{m}$  时,2 个零色散波长随  $D$  的变化规律; (c)  $\Lambda = 6.4 \mu\text{m}$  时,群速度随  $D$  的变化规律。

Fig. 6 (a) Chromatic dispersion varies with different  $D$  when  $\Lambda = 6.4 \mu\text{m}$ ; (b) two zero-dispersion wavelengths vary with different  $D$  at  $\Lambda = 6.4 \mu\text{m}$ ; (c) group velocity varies with different  $D$  when  $\Lambda = 6.4 \mu\text{m}$

## 4 结 论

设计的全固硫系 MOF 以  $\text{As}_2\text{Se}_3$  为基底,4 个低折射率材料 ( $\text{As}_2\text{S}_5$ ) 固体棒以正方形结构排布在包层区域,结构简单,易于拉制,并且在中红外有 2 个零色散波长。从理论分析了该全固 MOF 相对空气孔结构 MOF 所具有的优势,详细研究了其基模有效折射率、有效模面积、非线性系数、限制损耗、色散系数和群速度随  $D$  和  $\Lambda$  的变化规律。该光纤的 2 个零色散波长间距在  $2706 \sim 3773 \text{ nm}$  区间内连续可调,能有效地控制超连续、光孤子、色散波以及四波混频等非线性光学效应的产生,为中红外硫系光纤技术的应用提供了一定

的理论导向。

### 参 考 文 献

- 1 Russell P J. Photonic-crystal fibers[J]. IEEE J Lightwave Technol, 2006, 24(12): 4729-4749.
- 2 Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. Rev Mod Phys, 2006, 78(4): 1135-1184.
- 3 Wang Wei, Hou Lantian. Present situation and future development in photonic crystal fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(2): 43-58.  
王 伟, 侯蓝田. 光子晶体光纤的现状和发展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(2): 43-58.
- 4 Knight J C, Birks T A, J Russell P S, *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. Opt Lett, 1996, 21(19): 1547-1549.
- 5 Singh S P, Varshney S K. Tunable optical parametric amplification characteristics of liquid-filled chalcogenide photonic crystal fibers[J]. Opt Lett, 2013, 38(19): 3846-3849.
- 6 Lee T, Jung Y, Codemard C A, *et al.*. Broadband third harmonic generation in tapered silica fibres[J]. Opt Express, 2012, 20(8): 8503-8511.
- 7 Hu Minglie, Song Youjian, Liu Bowen *et al.*. Development and advanced applications of femtosecond photonic crystal fiber laser technique[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1660-1670.  
胡明列, 宋有建, 刘博文, 等. 光子晶体光纤飞秒技术研究发展及其前沿应用[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1660-1670.
- 8 Wang Xiaoyan, Li Shuguang, Liu Shuo, *et al.*. Mid-infrared  $As_2S_3$  chalcogenide glass broadband normal dispersion photonic crystal fiber with high birefringence and high nonlinearity[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 367-372.  
王晓琰, 李曙光, 刘 硕, 等. 中红外高双折射高非线性宽带正常色散  $As_2S_3$  光子晶体光纤[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 367-372.
- 9 Demircan A, Amiranashvili S, Brée C, *et al.*. Compressible octave spanning supercontinuum generation by two-pulse collisions[J]. Phys Rev Lett, 2013, 110(23): 233901.
- 10 Jia Zhen'an, Wang Junfeng, Zhou Hong, *et al.*. Research on optical fiber hydrogen sulfide gas detection with absorption spectrum[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 073001.  
贾振安, 王俊锋, 周 红, 等. 吸收型光纤硫化氢气体检测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 073001.
- 11 Zhao Xingtao, Zheng Yi, Liu Xiaoxu, *et al.*. Simulation of photonic crystal fiber with three and four zero-dispersion wavelengths[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(19): 194210.  
赵兴涛, 郑 义, 刘晓旭, 等. 具有三个及四个零色散波长光子晶体光纤的仿真研究[J]. 物理学报, 2012, 61(19): 194210.
- 12 Wang Wei, Yang Bo. Dispersion and birefringence analysis photonic crystal fiber with rhombus air-core structure[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(6): 064601.  
王 伟, 杨 博. 菱形纤芯光子晶体光纤色散与双折射特性分析[J]. 物理学报, 2012, 61(6): 064601.
- 13 Hou Yu, Zhou Guiyao, Hou Lantian, *et al.*. Analysis of dispersion properties of octagonal structured photonic crystal fiber with double cladding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 1068-1072.  
侯 宇, 周桂耀, 侯蓝田, 等. 八边形双包层光子晶体光纤色散特性分析[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1068-1072.
- 14 Bi W, Li X, Gao J, *et al.*. Numerical simulations of the ultrabroadband supercontinuum generation by dual-wavelength pumping in photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths[J]. Applied Optics, 2015, 54(14): 4542-4548.
- 15 Wang Cui, Dai Shixun, Zhang Peiqing, *et al.*. Research progress of infrared supercontinuum generation in chalcogenide glass fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030001.  
汪 翠, 戴世勋, 张培晴, 等. 基于硫系玻璃光纤的红外超连续光谱的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030001.
- 16 Boucon A, Sylvestre T, Kien P H, *et al.*. Supercontinuum generation by nanosecond dual-pumping near the two zero-dispersion wavelengths of a photonic crystal fiber[J]. Opt Commun, 2011, 284(1): 467-470.
- 17 Inoue K. Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region[J]. IEEE J Lightwave Technol, 1992, 10(11): 1553-1561.
- 18 Domingue S R, Bartels R A. Three-photon excitation source at 1250 nm generated in a dual zero dispersion wavelength

- nonlinear fiber[J]. *Opt Express*, 2014, 22(25): 30777-30785.
- 19 Yin Dongmei, Dai Shixun, Wang Xunsi, *et al.*. Research progress of infrared chalcogenide glass fibers in sensing fields [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020010.  
尹冬梅, 戴世勋, 王训四, 等. 红外硫系玻璃光纤在传感领域的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020010.
- 20 Dai Shixun, Yu Xingyan, Zhang Wei, *et al.*. Research progress of chalcogenide glass photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 090602.  
戴世勋, 於杏燕, 张 巍, 等. 硫系玻璃光子晶体光纤研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 090602.
- 21 Mouawad O, Picot-Clément J, Amrani F, *et al.*. Multioctave midinfrared supercontinuum generation in suspended-core chalcogenide fibers[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(9): 2684-2687.
- 22 Cheng T L, Kanou Y, Asano K, *et al.*. Soliton self-frequency shift and dispersive wave in a hybrid four-hole  $\text{AsSe}_2\text{-As}_2\text{S}_5$  microstructured optical fiber[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 104(12): 121911.
- 23 Sun Lihong, Wang Xunsi, Zhu Qingde, *et al.*. Advance on the exploration and evaluation of highly nonlinear chalcogenide glasses[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 020001.  
孙礼红, 王训四, 祝清德, 等. 高非线性硫系玻璃开发及其理论研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 020001.
- 24 White R T, Monro T M. Cascaded Raman shifting of high-peak-power nanosecond pulses in  $\text{As}_2\text{S}_3$  and  $\text{As}_2\text{Se}_3$  optical fibers[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(12): 2351-2353.
- 25 Yee Kane. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media[J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1966: 302-307.