

doi:10.3788/gzxb20164509.0919002

# 中红外色散平坦渐减光纤设计

杨佩龙<sup>1</sup>, 戴世勋<sup>2</sup>, 罗宝华<sup>2</sup>, 王军利<sup>1</sup>

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2 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)

**摘 要:**设计了一种以  $As_2S_3$  玻璃为纤芯、碲酸盐玻璃为微结构包层的锥形光子晶体光纤. 该结构光纤兼具阶跃折射率光纤和光子晶体光纤双重特性, 具有色散调制灵活性高且限制损耗低等优点. 模拟结果表明: 优化该光纤结构包层空气孔径、孔间距、纤芯直径等特征参量, 使参量之间及参量与锥区长度之间满足特定线性关系时, 该光纤在  $2\sim 4.5\ \mu\text{m}$  中红外波段呈现色散平坦渐减特性; 对该光纤微包层进行折射率  $\sim 1.6$  的液体油填充处理, 色散曲线对称性及平坦性得到进一步优化. 该光纤在超短脉冲压缩与展宽、色散波、光孤子及中红外平坦超连续谱产生等领域应用潜力巨大.

**关键词:**非线性光学; 色散平坦渐减光纤; 中红外; 硫系玻璃; 光子晶体光纤

中图分类号: O437.4; O431.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)09-0919002-6

## Design of Dispersion Flattened and Dispersion Decreasing Fiber in Mid-infrared Region

YANG Pei-long<sup>1</sup>, DAI Shi-xun<sup>2</sup>, LUO Bao-hua<sup>2</sup>, WANG Jun-li<sup>1</sup>

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

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

**Abstract:** A photonic crystal fiber with  $As_2S_3$  glass core and tellurite glass micro-cladding was designed. This design is a perfect combination of both traditional step index fiber and photonic crystal fiber and own the characteristics of high dispersion adjustment flexibility and low confinement lose. Simulation results show that, by carefully optimizing the characteristic structure parameters such as the fiber cladding air holes diameter, air hole pitches and fiber core diameter of this fiber, and while letting the parameters above meet linear relationship with fiber length, the dispersion profile of this fiber will be flattened and decreasing with fiber length in mid-infrared region of  $2\sim 4.5\ \mu\text{m}$ . In addition, we optimized the dispersion of this fiber by filling the air holes of micro-cladding with oil which linear index is around 1.6. Fiber with such novel dispersion property is rare and will be of great importance in applications of laser pulse compression and stretching, dispersive wave generation, soliton and mid-infrared super-continuum generation.

**Key words:** Nonlinear optics; Dispersion flattened and dispersion decreasing; Mid-infrared; Chalcogenide glass; Photonic crystal fiber

**OCIS Codes:** 190.4370; 230.0230; 060.2310; 060.2340

## 0 引言

硫系玻璃具有宽的红外透过范围( $1\sim 12\ \mu\text{m}$ )、较

高的线性折射率( $2.0\sim 3.5$  之间)和非线性折射率  $n_2$  ( $n_2 = 2\sim 20 \times 10^{-18}\ \text{m}^2/\text{W}$ , 是石英材料的  $100\sim 1\ 000$  倍)、以及材料组分灵活可调等优点<sup>[1]</sup>. 近年来, 基于硫

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61435009)资助

第一作者: 杨佩龙(1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为中红外光纤非线性. Email: yangpei\_long@126.com

通讯作者: 王军利(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为超快激光技术及其应用等. Email: dispersion@126.com

收稿日期: 2016-03-29; 录用日期: 2016-06-22

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

系玻璃的光子晶体光纤作为一种新型光波导器件,可广泛应用于中红外激光能量传输<sup>[2]</sup>、空间调零干涉<sup>[3]</sup>、中红外生物和化学传感<sup>[4]</sup>、中红外光纤激光器<sup>[5]</sup>、中红外超连续谱产生等<sup>[6]</sup>领域.色散是光纤的固有特性之一,在光通信系统及一些光纤器件中,光纤色散大小都必须得到合理控制<sup>[7]</sup>.特别是在非线性光学领域中,如高质量超连续谱的产生,就要求光纤色散在泵浦激光中心波长处满足近零平坦的关系<sup>[8]</sup>.

色散平坦渐减光纤(Dispersion Flattened and Decreasing Fiber, DFDF)是一种同时具有色散平坦光纤和色散凸值光纤双重特性的光纤,该光纤最大特点是其群速色散与波长满足二次函数关系且沿着光纤长度呈渐减关系.1989年,E. M. Dianov等<sup>[9]</sup>发现在色散平坦渐减光纤中周期性调制连续光信号可产生重复频率达太赫兹量级的孤立波串(光孤子).由于光孤子在通信、超短脉冲激光产生等领域应用潜力巨大,随后关于高重复频率超短脉冲在光纤中传输及光孤子产生的研究引起研究人员的广泛关注.在超连续谱产生方面,1994年,T. Morioka等<sup>[10]</sup>用平均功率为1.7 W,脉冲宽度为3.3 ps,中心波长为1 542 nm的激光泵浦色散平坦渐减单模石英光纤,产生了20 dB带宽覆盖1 440~1 640 nm波段、超过200 nm平坦超连续谱;1997年,该团队又通过对理想DFDF模拟分析,得到了和之前实验结果完全相同的结论,论证了3年前实验的可靠性<sup>[11]</sup>.DFDF中产生的超连续谱形状最大特征是对称展宽的谱中泵浦残余成份较强,两边的谱很平坦,光谱强度与波长关系整体呈梯形分布,在密集波分复用系统中有较为重要的应用前景;2004年,日本科学家Toshihiko Hirooka等<sup>[12]</sup>提出一种在正常色散DFDF光纤中产生抛物状脉冲的新方法,并成功实现了抛物状脉冲输出,且理论和实验结果相吻合,该过程可避免在常规色散机制下单模光纤中由于自相位调制效应而引入的脉冲啁啾导致的脉冲分裂,为实现超短脉冲的进一步压缩提供了基础;2007年,法国科学家Christophe Finot等<sup>[13]</sup>也仅用一根正常色散渐减光纤,在20 MHz、1 558 nm激光作用下实现了抛物状脉冲输出,理论和实验完全吻合;2014年,伊朗科学家Hassan Pakarzadeh等<sup>[14]</sup>理论分析了锥形DFDF通过四波混频效应实现脉冲放大的可能性,同时模拟基于2 W、1 064 nm Nd:YAG激光泵浦12 m长的石英基质DFDF,发现该光纤具有较宽的增益带宽,说明具有色散平坦渐减特性的锥状光子晶体光纤比未拉锥光纤增益带宽更宽;2015年,天津大学徐永钊等<sup>[15]</sup>研究得出了DFDF中影响脉冲展宽的因素主要取决于输入孤子阶数,归一化色散斜率及光纤长度等因素,为以后的实验工作奠定了基础.

所述都是关于DFDF在近红外波长的相关应用研

究,由于通信光纤和中红外光纤材料特性差异巨大,标准的中红外DFDF设计和制备难度较大,一定程度上限制了中红外DFDF的应用研究,因此目前有关中红外波段DFDF的设计和应用相关研究工作均鲜有报道.

本文设计了一种由As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>玻璃作为纤芯、硝酸盐玻璃微结构包层复合微结构光纤,该光纤兼具阶跃折射率及光子晶体光纤双重光学特性,在光学性质调控方面灵活性更高;通过调整包层空气直径 $d$ 和孔间距大小 $\Delta$ ,最终设计得到2~4.5  $\mu\text{m}$ 波长范围内色散曲线呈平坦渐减分布的光纤结构,最后通过包层空气内孔填充液体介质(折射率高于空气)的方式,实现光纤色散曲线对称性的进一步优化.

## 1 光纤结构设计

有关该光纤的设计思路及选材方面的相关背景均已在文献<sup>[16]</sup>报道过.与单一材料光子晶体光纤制备相比较,该光纤制备的最大难点在于纤芯和包层材料的选择,既要考虑到两种材料热胀系数,玻璃转变温度是否匹配,又要考虑其光学特性如透过带宽及折射率等因素.本文所选用的包层材料为组分76.5TeO<sub>2</sub>-6Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-11.5Li<sub>2</sub>O-6ZnO(mol%)的硝酸盐玻璃<sup>[17]</sup>,其红外截至波长为4.5  $\mu\text{m}$ ;纤芯材料为As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>,具有较宽的红外透过范围宽(1~12  $\mu\text{m}$ ),高的非线性折射率( $n_2$ 可达 $5.9 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$ )<sup>[16]</sup>,中红外波段的材料吸收损耗可低至1 dB/m以下,通过差分量热仪分析得知该两种材料的玻璃转变温度十分接近( $T_g \approx 190^\circ\text{C}$ )<sup>[17]</sup>,且热胀系数小,热稳定性良好,可避免光纤在拉制过程中由于材料匹配度低而造成的断裂和气泡等现象的产生.基于实验室现有的拉丝及自制机械钻孔设备,该光纤预制棒的制备将采用机械钻孔法和管棒法相结合方法实现.

为降低实验难度,进一步优化光纤结构和色散,本文在之前工作基础上主要实现了两大改进:一方面将原来三层空气孔结构调整成两层,这主要是因为目前实验室精确制备多孔微结构光纤的技术还不成熟,对光子晶体光纤制备而言,更多的空气孔意味着制备难度也进一步增大,因此,在保证基本光学性能不受太大影响的前提下,减少包层空气孔数目将会有效降低光纤制备难度;另一方面,通过折射率匹配的液态油填充包层空气孔实现对光纤色散的进一步优化.该研究是对之前工作的一个重要补充和完善.

图1为所设计光纤的结构示意图,其中箭头所指的图为光纤截面图,图中两层六角分布的黑点表示包层空气孔(Air hole)分布,同一层孔环上的空气孔大小相同,而不同层空气孔径不同,分别用 $d_1$ ,  $d_2$ 表示,中心深红色部分表示As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>纤芯,直径用 $D$ 表示,外围红色部分均为硝酸盐玻璃材料[76.5TeO<sub>2</sub>-6Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-11.5Li<sub>2</sub>O-6ZnO(mol%)],结合空气孔形成微结构包

层结构. 光纤结构设计主要考虑光纤在中红外非线性领域应用所涉及的一系列重要光学特性如限制损耗、非线性及色散特性, 本文重点探究其色散特性. 箭头下方图为光纤的径向分布图, 光纤径向呈锥形分布, 将在较短长度范围内表现出较高非线性<sup>[18]</sup>.

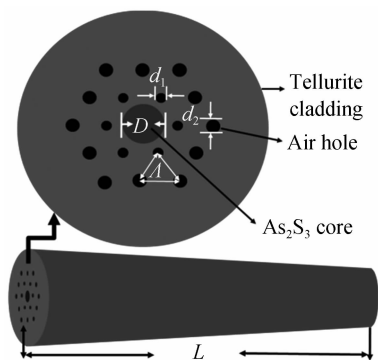


图1 上下两图分别为所设计光纤端面和轴向结构  
Fig.1 Schematic of the cross section and the axial configurations of the designed fiber

### 1.1 光纤折射率计算

光纤色散计算中所用材料的折射率分布由

Sellmeier 公式  $n^2(\lambda) - 1 = \sum_{i=1}^l \frac{f_i \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_i^2)}$  拟合得到,  $\lambda$  为波长(单位  $\mu\text{m}$ ), 对于微结构包层材料磷酸盐玻璃<sup>[17]</sup>及纤芯  $\text{As}_2\text{S}_3$  材料<sup>[17]</sup>, 相关拟合参量  $l, f_i$  和  $\lambda_i^2$  见表 1.

表 1 Sellmeier 拟合所用磷酸盐及和  $\text{As}_2\text{S}_3$  玻璃参量  
Table 1 Sellmeier fitting coefficients for the materials tellurite and  $\text{As}_2\text{S}_3$  glasses

	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$
Tellurite $f_i$	1.671 9	1.348 6	0.621 9		
( $l=3$ ) $\lambda_i^2$	0.000 47	0.057 46	46.725 43		
$\text{As}_2\text{S}_3$ $f_i$	1.898 4	1.922 3	0.876 5	0.118 9	0.957 0
( $l=5$ ) $\lambda_i^2$	0.022 5	0.062 5	0.122 5	0.202 5	750

经有限元法计算得到的光纤端面折射率分布如图 2(a)和(c), 其中(a)包层为空气孔微结构, (c)包层为用油填充空气孔后的微结构包层, 其中所填充油(液态)的折射率 $\sim 1.6$ , 两种光纤对应的色散特性差异将随后给出; 图(b)和(d)分别为设定中心波长为  $2.8 \mu\text{m}$  泵浦下, 通过有限元方法计算得到这两种不同包层结构下对应的基模模场分布, 基模被很好地限制在纤芯中.

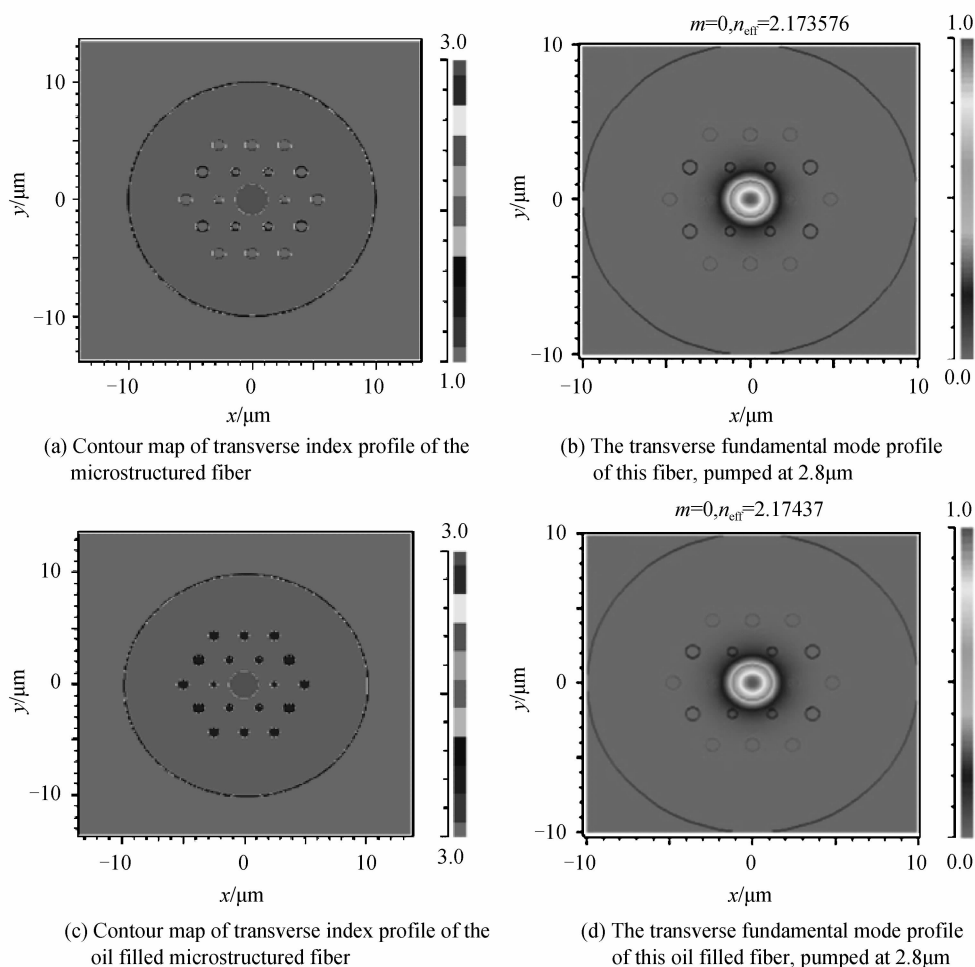


图2 光纤包层空气孔油填充前后对比

Fig.2 The comparison between oil filled cladding fiber and air hole cladding fiber

### 1.2 光纤结构分析

光脉冲在光纤中传输的轴向分布图如图 3, 在理想的拉锥环境下通过精确设计拉锥速度, 光纤的直径将随锥区长度增大逐渐减小, 光纤包层的空气孔及光纤纤芯直径也满足同样的渐变关系. 根据几何关系很容易得到光纤半径和拉锥锥区长度满足:  $R_i(z) = R_1 - z/L(R_1 - R_s)$ , 同样的包层空气孔径  $d$  和孔间距  $\Delta$  也分别满足类似关系:  $R_i(z) = d_1 - z/L(d_1 - d_s)$ ,  $\Delta_i(z) = \Delta_1 - z/L(\Delta_1 - \Delta_s)$ ,  $d_1$  和  $d_s$  分别表示始端和末端孔直径,  $\Delta_1$  和  $\Delta_s$  分别表示始端和末端孔间距.

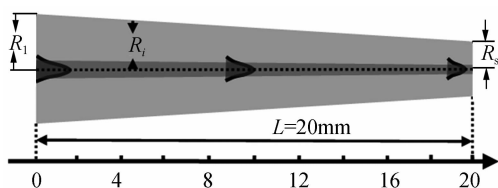


图 3 光纤几何结构及脉冲在光纤中传输示意图  
Fig. 3 The schematic plot of pulse transmission in the designed fiber

## 2 光纤色散特性分析

光纤色散特性是光纤非常重要的光学特性之一, 在中红外超连续谱的产生过程中, 要获得高质量的中红外超连续光谱输出, 往往要求光纤的零色散波长位于短波长, 与目前较为成熟的泵浦激光中心波长匹配且色散曲线近零平坦. 因此, 具有特定用途的光纤在制备之前必须首先必须对其色散分布进行较为精确地设计.

虽然  $As_2S_3$  是目前各组分硫系玻璃中为数不多的热稳定性高、材料本征损耗低、非线性折射率高且成纤特性好的玻璃组分之一, 但和其他组分硫系玻璃类似, 其中红外波段材料色散较大如图 4, 零色散波长 (Zero Dispersion Wavelength, ZDW) 处在  $\sim 4.9 \mu m$  附近, 而目前比较成熟的激光泵源的中心波长大多分布在  $2 \mu m$  以下, 为该材料的实际中红外非线性应用带来巨大挑战.

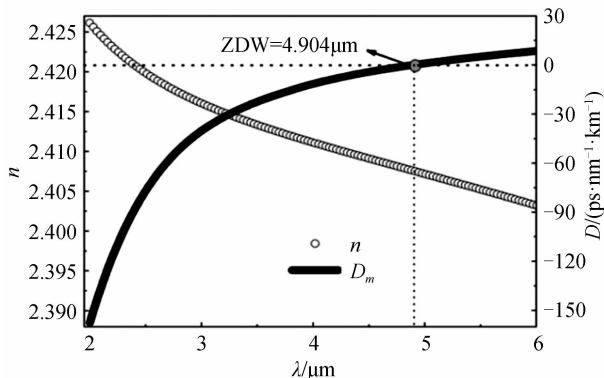


图 4  $As_2S_3$  玻璃的材料折射率及材料色散  
Fig. 4 The refractive index and the calculated material dispersion profile of  $As_2S_3$  glass

### 2.1 光纤色散设计及优化

具有两个零色散点且色散值沿着光纤轴向渐减的光纤在非线光学领域有着非常重要的研究价值, 但具有这种特殊色散特性的光纤往往难以制备. 因为通常情况下光纤材料色散是确定的, 往往需要通过调节波导色散来实现总色散调制, 波导色散大小及正负与光纤结构相关, 因此就要求光纤结构轴向变化, 这无论对于光纤设计还是制备都很难实现. 特别是对于阶跃折射率光纤, 其结构调整维度低, 难以实现对色散有效调制, 但纯粹的单一材料光子晶体光纤往往做到纤芯很小时限制损耗超高, 严重影响了光纤在非线领域的应用. 基于以上原因, 本文尝试采用  $As_2S_3$  材料作为纤芯, 碲酸盐玻璃为微结构包层, 打破传统单一结构束缚, 实现新色散特性的光纤结构.

光纤色散计算需首先采用有限元法求得光纤有效折射率的实部  $[Re(n_{eff})]$ , 光纤总色散系数与有效折射率之间的关系为  $D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \left( \frac{d^2 Re(n_{eff})}{d\lambda^2} \right)$ , 其中波长  $\lambda$  单位为  $\mu m$ . 为获得目标色散结果就需要对光纤结构进行仔细调整以实现色散的调节. 优化结果表明: 当光纤纤芯径满足  $D_i = 0.98\Delta_i$ , 两包层空气孔径与孔间距分别满足  $d_{1i}/\Delta_i = 0.233$ ,  $d_{2i}/\Delta_i = 0.467$  时 (其中  $D_i$ ,  $d_{1i}$ ,

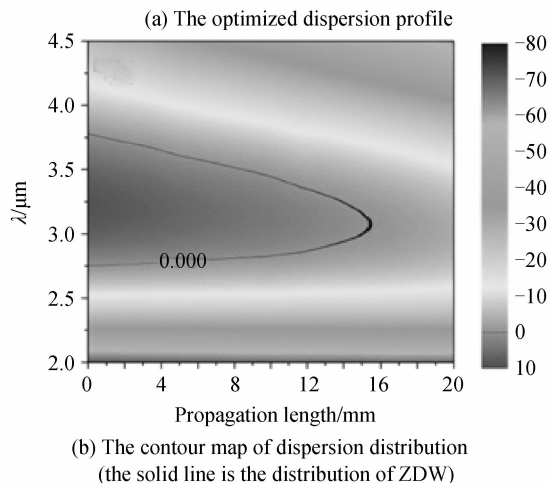
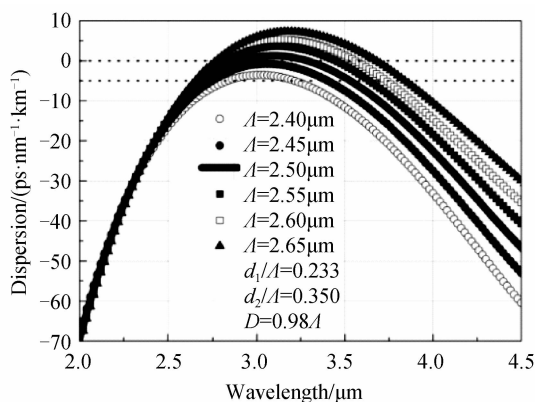


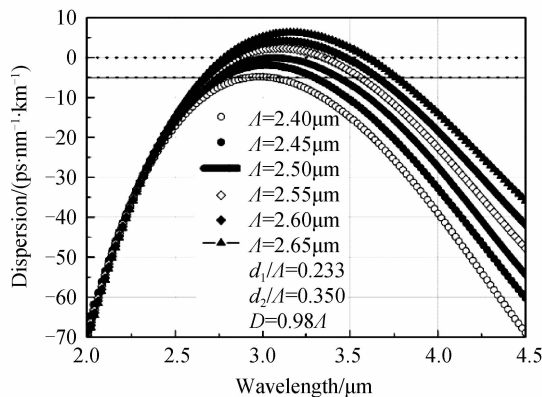
图 5 包层空气孔结构的光纤色散分布  
Fig. 5 Dispersion distribution of the microstructured fiber

$d_{2i}$  和  $\Lambda_i$  分别表示光纤在不同位置时对应的结构参量),可得到最优的色散分布如图5(a). 在2~4.5  $\mu\text{m}$  范围内,所有色散曲线近零平坦呈近似抛物线形状分布,  $\Lambda = 2.65 \mu\text{m}$  对应整体色散值最大,峰值位于~3.2  $\mu\text{m}$ 处,峰值色散~8.0  $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,两个零色散点分别分布于2.65  $\mu\text{m}$  和3.75  $\mu\text{m}$  处. 随着光纤结构变化长波长处零色散点位置蓝移,而短波长处零色散点几乎不随结构变化,总体色散值相应减小. 在  $\Lambda$  为2.50  $\mu\text{m}$  处,色散曲线峰值趋近于零但小范围内仍处于反常色散区;  $\lambda < 2.50 \mu\text{m}$  对应色散曲线均处在全正常色散区. 在所研究的结构范围内,  $\Lambda$  在2.40  $\mu\text{m}$  处对应整体色散值最小,峰值处色散值约为-4.0  $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ .

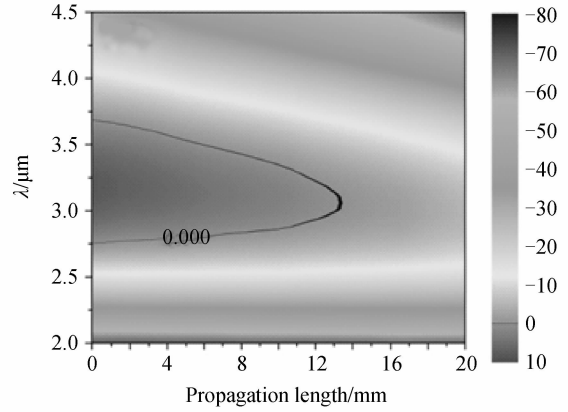
根据光纤结构与锥区长度之间的关系,得到色散随长度变化及不同波长处色散分布如图5(b),图中实线表示不同锥区长度对应光纤零色散点位置分布,可知不同长度处零色散点近似关于  $\lambda = 3.1 \mu\text{m}$  呈对称分布.

### 2.2 包层空气孔填充技术优化光纤色散

以上结果表明,与短波长( $< 3.1 \mu\text{m}$ )处色散曲线相比较,长波长( $> 3.1 \mu\text{m}$ )处的色散曲线斜率较小,影响了曲线整体对称性. 而经大量计算表明,要实现光纤色散的进一步优化,单纯依赖调节光纤结构很难再有明显效果. 因此,尝试用不同折射率材料代替空气,通过包层折射率变化来实现光纤色散调制是光纤色散设计另一有效途径. 但考虑到实验上的可行性,替代材料必须无毒、易于实现且物理性能较稳定. 通过大量模拟实验及考察已报道的实验结果<sup>[19]</sup>,最终确定用折射率~1.6的油作为填充介质,再次优化结果如图6. 与优化之前相比较,在2~4.5  $\mu\text{m}$  波长范围内其色散曲线的对称性更好,且不同位置对应的色散值略微减小. 通过图5(a)与图6(a)两图中的虚线对应色散值比较,很容易看出不同结构对应的色散曲线整体均有值略微下降趋势.  $\Lambda = 2.40 \mu\text{m}$  处对应色散曲线最大色散值降低至-5  $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $\Lambda = 2.50 \mu\text{m}$  处对应最大色



(a) The further optimized dispersion profile



(b) The contour map of dispersion distribution (the solid line is the distribution of ZDW)

图6 包层空气孔油填充结构的光纤色散分布

Fig. 6 Dispersion distribution of microstructured fiber with oil filled micro-cladding

散值也降至0  $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  位置,整个色散曲线整体关于3.1  $\mu\text{m}$  波长处呈对称分布,且随着光纤结构等间隔变化,色散曲线间的色散值也近似呈等间隔变化关系,表现出较好色散渐减特性. 从图5(b)与图6(b)光纤色散沿轴向分布比较来看,优化后色散曲线双零色散点对称性更好,且在较短的传输长度范围内可实现全正常色散,将在中红外色散补偿,孤子及色散波的产生方面具有很大潜在应用价值.

### 3 结论

在传统光子晶体光纤的基础上设计了一种能在中红外2~4.5  $\mu\text{m}$  实现色散平坦渐减特性的锥状、软玻璃材料、复合结构光子晶体光纤结构,其最大的优势在于更高的色散调节灵活性和更高的光场的限制能力. 通过模拟分析发现,该光纤色散主要受纤芯直径  $D$ 、包层空气孔尺寸  $d$  及空间距的  $\Lambda$  影响较大,当各孔间距  $\Lambda$  随光纤长度呈线性递减关系,同时满足  $d_1/\Lambda = 0.233$ ,  $d_2/\Lambda = 0.350$ ,  $D = 0.98\Lambda$  时,色散系数在2~4.5  $\mu\text{m}$  中红外波段呈近似抛物线状分布且色散曲线整体呈下降趋势,满足色散平坦渐减光纤的基本特征. 但不足在于曲线的总体对称性较差,且很难继续通过对光纤的结构参数的调整实现曲线对称性的优化. 进一步研究发现,通过选择性折射率匹配液体(折射率为1.6的液态油)填充该光子晶体光纤来微调包层有效折射率,可实现对现有光纤色散曲线对称性的有效调制. 最终采用该方法优化得到关于波长~3.1  $\mu\text{m}$  光纤色散曲线对称性好且更平坦的光纤结构. 与本组之前报道的光纤结构相比该光纤结构更加简单,更易于实验室加工及制备.

由于所设计的微结构光纤孔间距,芯径及包层孔尺寸均在微米量级,且光纤色散对各结构参数的变化响应比较敏感,为实际光纤制备的准确度控制带来的

巨大挑战. 后续将进一步探索该光纤的制备及其奇异色散机制下光纤的非线性效应.

## 参考文献

- [1] DAI Shi-xun, YU Xin-yan, ZHANG Wei, *et al.* Research progress of Chalcogenide glass photonic crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 1-10.  
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): 1-10.
- [2] ARAI T, KIKUCHI M, SAITO M, *et al.* Power transmission capacity of As-S glass fiber on CO laser delivery [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, **63**(9): 4359-4364.
- [3] HOUZOT P, BOUSSARD-PLÚDEL C, FABER A, *et al.* Infrared single mode chalcogenide glass fiber for space [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(19): 12529-12538.
- [4] CHARPENTIER F, NAZABAL V, TROLES J, *et al.* Infrared optical sensor for CO<sub>2</sub> detection [C]. SPIE, 2009, **7356**: 2838-2847.
- [5] SANGHERA J S, BRANDON S L, AGGARWAL I D. Chalcogenide glass-fiber-based mid-IR sources and applications [J]. *Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(1): 114-119.
- [6] BORA U, MAKSIM S. Chalcogenide microporous fibers for linear and nonlinear applications in the mid-infrared [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(8): 8647-8659.
- [7] DAI Neng-li, LI Yang-peng, JING Gang, *et al.* Development of dispersion flattened photonic crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 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**(1): 1-8.
- [8] YAN X, CHAUDHARI C, QIN G, *et al.* Ultraflat supercontinuum generation in an As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> based chalcogenide core microstructured fiber [C]. International Society for Optics and Photonics. Moscone; SPIE service center, 2010: 75981M-75981M-75988.
- [9] DIANOV E M, MAMYSHEV P V, PROKHOROV A M, *et al.* Generation of a train of fundamental solitons at a high repetition rate in optical fibers [J]. *Optics Letters*, 1989, **14**(18): 1008-1010.
- [10] MORIOKA T, KAWANISHI S, MORI K, *et al.* Nearly penalty-free, less than 4 ps supercontinuum Gbit/s pulse generation over 1535-1560 nm [J]. *Electronics Letters*, 1994, **30**(10): 790-791.
- [11] MORI K, TAKARA H, KAWANISHI S, *et al.* Flatly broadened supercontinuum spectrum generated in a dispersion decreasing fibre with convex dispersion profile [J]. *Electronics Letters*, 1997, **33**(21): 1806-1808.
- [12] TOSHIHIKO H, MASATAKA N. Parabolic pulse generation by use of a dispersion-decreasing fiber with normal group [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(5): 498-500.
- [13] CHRISTOPHE F, BENO B, GUY M, *et al.* Parabolic pulse generation with active or passive dispersion decreasing optical fibers [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(24): 15824-15835.
- [14] PAKARZADEH H. Parametric amplification in tapered photonic crystal fibers with longitudinally decreasing zero-dispersion wavelength [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, **126**(24): 5509-5512.
- [15] XU Yong-zhao, YE Hai, LI Hong-tao, *et al.* Design of optimum supercontinuum spectrum generation in a dispersion decreasing fiber [J]. *Optoelectronics Letters*, 2015, **11**(3): 217-221.
- [16] YANG Pei-long, ZHANG Pei-qing, DAI Shi-xun, *et al.* Tapered chalcogenide-tellurite hybrid microstructured fiber for mid-infrared supercontinuum generation [J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, **62**(9): 1-9.
- [17] CHAUDHARI C, LIAO M, SUZUKI T, *et al.* Chalcogenide core tellurite cladding composite microstructured fiber for nonlinear applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(13): 2069-2076.
- [18] KAWASHIMA H, KOHOUTEK T, YAN X, *et al.* Chalcogenide/tellurite hybrid microstructured optical fiber with high nonlinearity and flattened dispersion [J]. *Physica Status Solidic*, 2012, **9**(9): 2621-2624.
- [19] GUNDU K M, KOLESIK M, MOLONEY J V, *et al.* Ultraflattened-dispersion selectively liquid-filled photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(15): 6870-6878.