

doi :10. 3788/gzxb20154403. 0306003

## 4.3 $\mu\text{m}$ 低损耗硫系空芯光子带隙光纤结构设计及性能研究

董阳箭<sup>1</sup>, 戴世勋<sup>1</sup>, 张培晴<sup>1,2</sup>, 刘永兴<sup>1</sup>, 杨佩龙<sup>1</sup>, 王训四<sup>1</sup>

(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 中山大学 电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

**摘要:**运用平面波展开法分析  $\text{As}_2\text{S}_3$ 、 $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  和  $\text{As}_2\text{Se}_3$  硫系玻璃光纤在不同空气填充率下的带隙分布图, 分析结果表明三种材料在空气填充率提高到 0.75 时, 光子带隙与空气线均出现交汇模式, 且带隙宽度大, 纤芯空气孔中适宜进行激光传输. 运用有限元法分析不同纤芯孔直径的  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  硫系玻璃空芯光子带隙光纤的基模限制损耗和有效模场面积, 结果表明纤芯直径 9.2  $\mu\text{m}$  时限制损耗最低, 模场面积较小. 通过优化光纤的结构参量, 适合于 4.3  $\mu\text{m}$  波长处高功率中红外激光传输的空芯光子带隙光纤, 其限制损耗为 0.00472 dB/m, 有效模场面积为 58.046  $\mu\text{m}^2$ .

**关键词:** 光纤光学; 空芯光子带隙光纤; 平面波展开法和有限元法; 硫系玻璃; 低限制损耗

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-421(2015)03-0306003-6

### Design and Performance of a Low-loss Chalcogenide Hollow-core Photonic Crystal Fiber at 4.3 $\mu\text{m}$

DONG Yang-jian<sup>1</sup>, DAI Shi-xun<sup>1</sup>, ZHANG Pei-qing<sup>1,2</sup>,  
LIU Yong-xing<sup>1</sup>, YANG Pei-long<sup>1</sup>, WANG Xun-si<sup>1</sup>

(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:** The band-gap maps of  $\text{As}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  and  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide glass fibers at different air-fillings were analyzed by using the plane wave expansion method. The results show that when increased to 0.75, the photonic band gap and air lines have appeared intersection mode, the band gap is wide, and an appropriate laser transmission mode in the core of fiber is formed. Under different fiber core diameter, using the finite element method, the fundamental mode confinement loss and effective mode area of homemade  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  chalcogenide glass hollow-core photonic crystal fiber were systematically studied. The results show that the confinement loss is the lowest and the effective mode-field area is very small when the core diameter is 9.2  $\mu\text{m}$ . By optimizing the structural parameters of fiber, a hollow-core photonic crystal fiber with low confinement loss (0.00472 dB/m) and effective mode-field area (58.046  $\mu\text{m}^2$ ) at 4.3  $\mu\text{m}$  was obtained.

**Key words:** Fiber optics; Hollow-core photonic crystal fiber; Plane-wave expansion method and finite element method; Chalcogenide glass; Low confinement loss

**OCIS Codes:** 060.2280; 060.2390; 060.5295

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划 (No. 2012CB722703)、国家自然科学基金 (Nos. 61177087, 61435009)、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) 和宁波大学王宽诚幸福基金资助

**第一作者:** 董阳箭 (1988-), 男, 硕士研究生. 主要研究方向为带隙型硫系光子晶体光纤的结构设计及性能研究. Email: dongyangjian@163.com

**导师 (通讯作者):** 戴世勋 (1974-), 男, 研究员, 博导. 主要研究方向为红外硫系玻璃材料、特种玻璃光纤. Email: daishixun@nbu.edu.cn

**收稿日期:** 2014-06-30; **录用日期:** 2014-07-23

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

## 0 引言

飞行器高速飞行时喷出的高温尾焰羽流是重要的中红外辐射源. 羽流的主要组成部分是  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ , 这两种气体分子的能级结构决定了其尾焰在  $2.7\ \mu\text{m}$  和  $4.3\ \mu\text{m}$  波长具有较强的红外辐射<sup>[1]</sup>, 其中  $4.3\ \mu\text{m}$  波长的光谱辐射强度大, 能量集中, 背景均匀, 有较宽的光谱区间<sup>[2-3]</sup>. 随着中红外探测与激光技术的不断发展, 衰减极小的大气第二窗口 ( $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ) 引起人们的关注, 使得中红外激光可用于飞行器尾焰的追踪. 传统结构光纤和折射率引导型硫系光子晶体光纤, 具有很强材料本征吸收和瑞利散射, 使其在  $4.3\ \mu\text{m}$  处具有很大光纤传输损耗, 存在严重导能缺陷, 不能用于中红外激光传输<sup>[9]</sup>.

硫系玻璃在中红外波段拥有优良的透过性能 ( $2\sim 25\ \mu\text{m}$ )、高折射率 ( $2.0\sim 3.5$ )、低声子能量 ( $< 350\ \text{cm}^{-1}$ )、玻璃组分可调<sup>[4]</sup>等特性, 已成为空芯光子带隙光纤的理想材料. 空芯光子带隙光纤有很多优于传统光纤的特性, 通过改变光纤结构参量进行光子带隙的灵活计算是硫系带隙型光子晶体光纤应用的基础. 2003年美国海军实验室研究了 As-S 和 As-Se 基质光子带隙光纤的红外传输特性<sup>[5]</sup>, 2006年底拉制出第一根光子带隙 (Photonic Bandgap, PBG) 硫系光纤<sup>[6]</sup>; 2010年 Desevedavy F 等<sup>[7]</sup>设计并制备了硫系 ( $\text{Te}_{20}\text{As}_{30}\text{Se}_{50}$ ) 空芯光子晶体光纤, 并与模拟数据比较并分析了其光子带隙特性; 2011年李曙光等<sup>[8]</sup>用平面波展开法模拟了低限制损耗的硫系空芯光子晶体光纤, 在孔间距为  $4.2\ \mu\text{m}$  时能够传输波长为  $3.1\sim 3.7\ \mu\text{m}$  的激光能量; 2012年刘永兴等<sup>[9]</sup>设计了一种以  $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{S}_{62}$  玻璃基质包层正六边形空芯光子带隙光纤, 其在  $10.6\ \mu\text{m}$  处限制损耗小于  $0.1\ \text{dB/m}$  的大模场 (模场面积大于  $100\ \mu\text{m}^2$ ) 光子晶体光纤.

本文设计了一种硫系空芯光子带隙光纤, 能够使激光能量限制在光纤纤芯空气孔中传输. 分别选用不同的硫系玻璃作为光纤基质, 分析在不同光纤结构参量下, 完全光子带隙形成. 研究得到以无 As 环保型硫系  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  玻璃作为光纤基质材料的硫系空芯光子带隙光纤, 在空气填充率为  $0.80$ , 孔间距为  $3.5\ \mu\text{m}$ , 纤芯空气孔径直径为  $9.2\ \mu\text{m}$ , 空气孔层数为  $7$  时, 能形成较宽完全光子带隙, 同时具备低限制损耗和稳定有效基模模场面积, 适用于  $4.3\ \mu\text{m}$  波长的激光传输.

## 1 光纤结构设计及参量计算理论基础

### 1.1 端面结构设计

设计了一种包层空气孔成三角晶格排列的硫系空芯光子带隙光纤, 如图 1, 包层空气孔呈正六边形排

列, 外层空气孔直径为  $d$ , 相邻空气孔间距为  $\Lambda$ , 去掉第二层空气孔并增大光纤最中心位置空气孔直径  $D_{\text{core}}$ , 使得该光纤能够形成完全光子带隙, 且带隙包含的特定波长激光能够被限制在纤芯空气孔中传输, 从而降低光纤传输损耗并减小光纤有效模场面积.

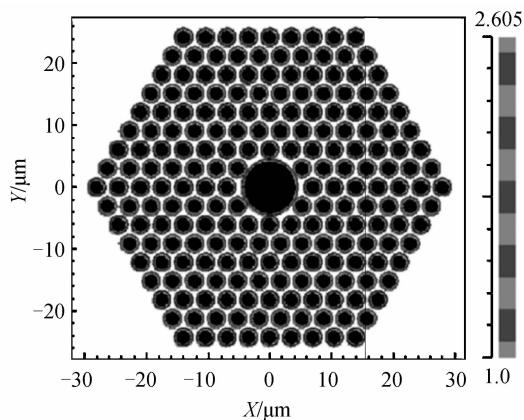


图 1 空芯光子带隙光纤端面结构示意图  
Fig. 1 Structure schematic diagram of hollow-core Bandgap PCF

采用有限元法 (Finite Element Method, FEM) 计算了设计的硫系 ( $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$ ) 空芯光子带隙光纤在  $4.3\ \mu\text{m}$  处基模模场分布情况, 光纤结构参量为:  $N_r = 7$ ,  $\Lambda = 3.5\ \mu\text{m}$ ,  $D_{\text{core}} = 9.2\ \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.80$ , 其模场分布如图 2, 可得出在  $4.3\ \mu\text{m}$  处, 光纤具有很好的单模传输模式, 相应波长的激光能量能够很好地被限制在光纤纤芯中. 对于空芯光子带隙光纤, 其允许的传输激光的波长仅存在于形成的光子带隙内, 可以运用平面波展开法 (Plane-wave Expansion Method, PWM)<sup>[21]</sup> 来系统设计和计算光纤的带隙图随光纤结构参量的变化规律, 从而得到传输特定激光波长的低损耗空芯光子带隙光纤结构参量.

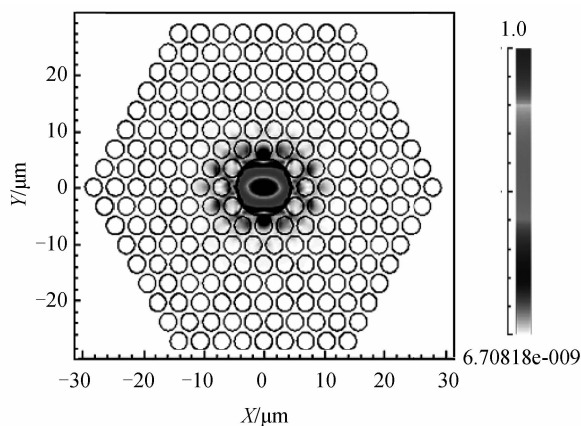


图 2 基模模场分布

Fig. 2 Mode-field distribution of its fundamental mode

### 1.2 基模限制损耗和模场面积

激光能量在空芯光子带隙光纤纤芯空气孔中传输, 可忽略光纤材料本征吸收和瑞利散射影响, 其限制

损耗可以由有效折射率虚部  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  得到<sup>[10-11]</sup>

$$\text{Loss} = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6 \text{ (dB/m)} \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为传输激光波长,  $n_{\text{eff}}$  是基模有效折射率,  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  为有效折射率虚部, 运用有限元法可计算得到光纤的有效折射率<sup>[12-14]</sup>.

有效模场面积<sup>[15-16]</sup>为

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\iint |E|^2 dx dy)^2}{\iint |E|^4 dx dy} \text{ (}\mu\text{m}^2\text{)} \quad (2)$$

式中  $E$  为光纤端面上的横向电场分量.

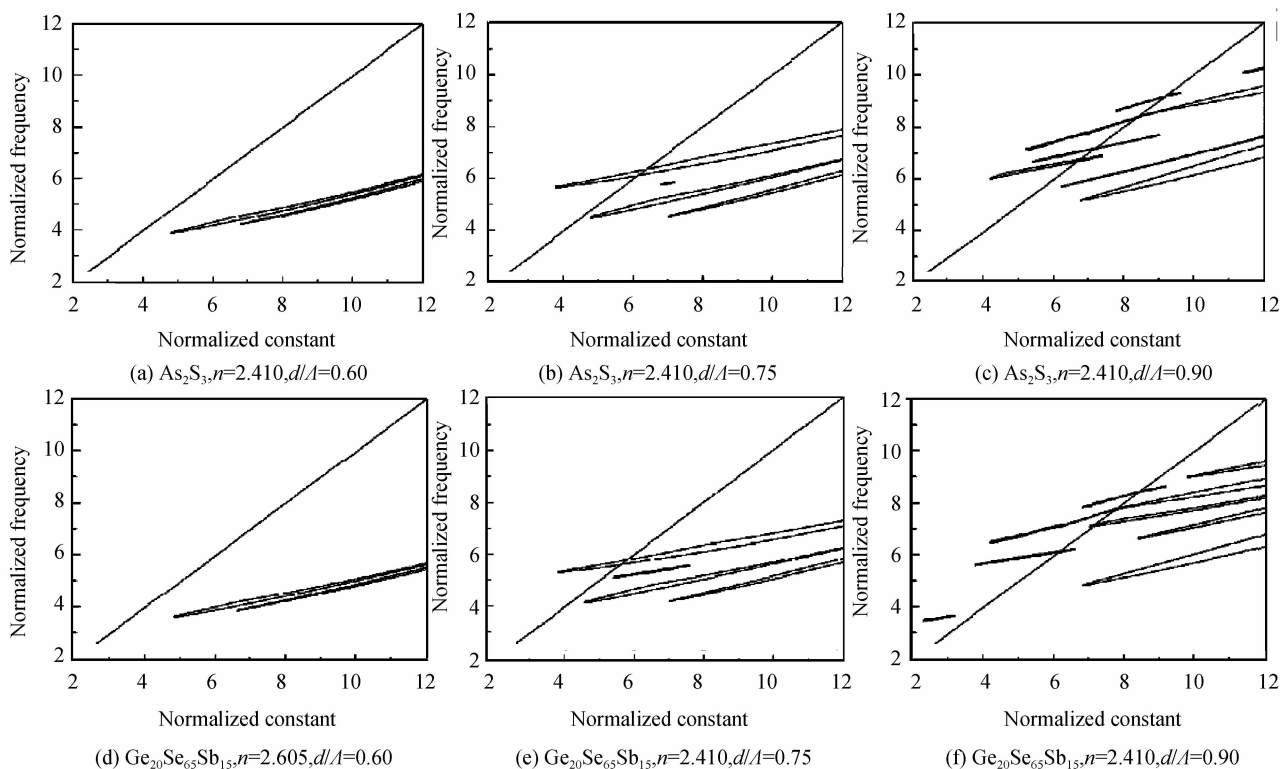
### 1.3 光纤基质材料选择

为研究不同折射率硫系玻璃材料对所设计的带隙光纤的带隙形成、光纤基模限制损耗和基模有效模场面积的影响, 选取三种不同组分的硫系玻璃分别作为光纤基质材料, 其中  $\text{As}_2\text{S}_3$  和  $\text{As}_2\text{Se}_3$  玻璃是两种公认的成纤性能优良的硫系玻璃, 其红外透过范围分别为  $0.6 \sim 8 \mu\text{m}$  和  $1.0 \sim 12 \mu\text{m}$ , 第三种为实验室自制的无 As 环保型  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  硫系玻璃, 红外透过范围为  $1.0 \sim 12 \mu\text{m}$ <sup>[17]</sup>. 三种不同组分硫系玻璃材料在不同波长下的折射率<sup>[18-20]</sup>如表 1.

表 1 三种玻璃在不同波长的折射率

Table 1 Refractive indexes at different wavelengths for three glasses

Wavelength/ $\mu\text{m}$	2	3	4	5	6
$\text{As}_2\text{S}_3$	2.427	2.415	2.412	2.405	2.403
$\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$	2.626	2.612	2.606	2.602	2.599
$\text{As}_2\text{Se}_3$	2.825	2.795	2.782	2.780	2.778



## 2 仿真模拟及计算结果

### 2.1 空芯光子带隙光纤的带隙特性

对于带隙型光子晶体光纤, 其允许的传播波长仅存在于光子带隙中, 为了获得传输特定波长的低损耗光纤的最优化结构参量, 首先运用平面波展开法分析三种不同基质玻璃的光纤带隙图随结构参量的变化规律, 分别选取空气填充率为  $d/\Lambda = 0.60, 0.75, 0.90$  的带隙结构, 如图 3. 可以看出当  $d/\Lambda$  等于 0.60 时, 三种基质玻璃的光纤中所对应的空气线与带隙图均没有相交部分, 此时没有形成完全带隙, 即光纤纤芯中不存在导模; 当  $d/\Lambda$  提高到 0.75 时, 三种材料的光纤空气线与带隙图出现了两条相交曲线, 且带隙宽度也较大, 此时纤芯空气孔中适宜进行激光传输; 进一步增大空气填充率  $d/\Lambda$  值到 0.90 时, 三种材料的光纤空气线与带隙图相交数目变多但带隙宽度逐渐变窄, 这不利于激光能量在空气孔中的传输. 与此同时, 在  $d/\Lambda$  相等的情况下, 光纤的空气线与带隙图相交区域, 随玻璃折射率的增大 (即从  $\text{As}_2\text{S}_3$  到  $\text{As}_2\text{Se}_3$  材料), 形成的完全光子带隙逐渐向低归一化频率方向移动, 而且带隙宽度逐渐变窄. 对于同一种硫系玻璃材料而言, 随着空气填充率  $d/\Lambda$  提高, 空气线与带隙图的相交区域从无到有, 即完全光子带隙逐渐形成, 继续增大  $d/\Lambda$  时, 此相交区域向高归一化频率方向移动.

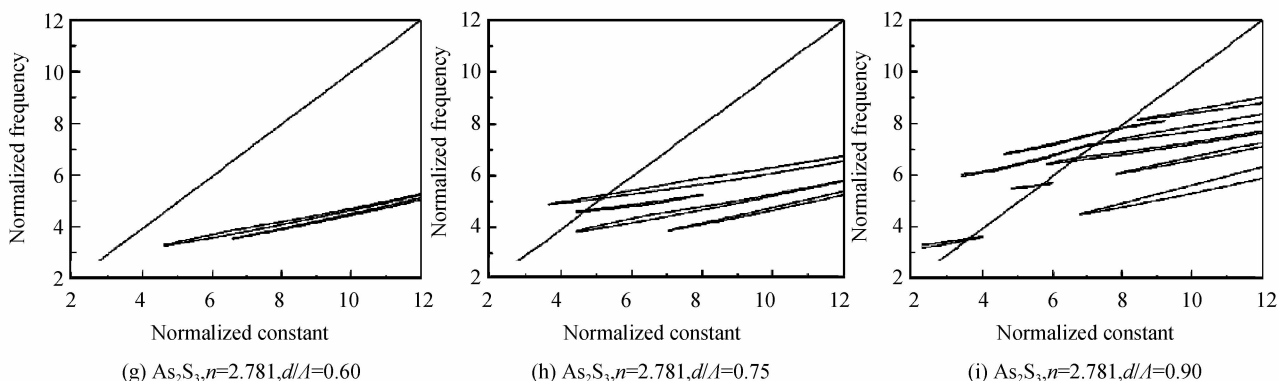


图3 不同基质材料和不同空气填充率下的带隙分布图

Fig. 3 Band-gap maps of three different refractive indexes and three different air-fillings

进一步优化光纤参量,得到空气线与带隙图相交时拥有较大带隙宽度的光纤结构参量.图4为无As环保型  $Ge_{20}Se_{65}Sb_{15}$  硫系玻璃的带隙分布.

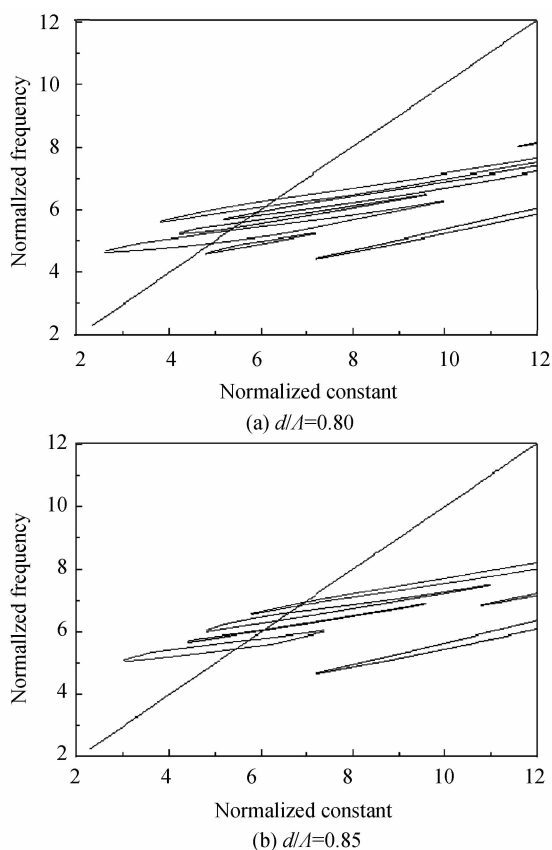


图4 带隙分布  $Ge_{20}Se_{65}Sb_{15}$  材料

Fig. 4 Band-gap maps of  $Ge_{20}Se_{65}Sb_{15}$

图4(a)中,带隙中心位置位于归一化频率  $\beta\Lambda = 5.1$ ,光纤参量为:  $\lambda = 4.3 \mu m$ ,  $n = 2.605$ ,  $\Lambda = 3.50 \mu m$ ,  $d/\Lambda = 0.80$ ; 图4(b)中,  $\beta\Lambda = 5.6$ ,  $\lambda = 4.3 \mu m$ ,  $n = 2.605$ ,  $\Lambda = 3.84 \mu m$ ,  $d/\Lambda = 0.85$ . 可以看出当  $d/\Lambda$  为 0.80 和 0.85 时,带隙图的空气线与带隙图相交区域较多,且带隙宽度较宽,该光纤结构能够形成在空气孔中

的传播模式,适用于传输  $4.3 \mu m$  高功率的激光能量.

## 2.2 空芯光子带隙光纤限制损耗和有效模场面积计算

依据带隙模拟结果,计算光纤的基模限制损耗与有效模场面积.为使光纤传输激光波长位于  $4.3 \mu m$  处,根据图4计算的带隙结构图,取  $\Lambda = 3.5 \mu m$ ,  $d/\lambda = 0.80$ ,选择  $Ge_{20}Se_{65}Sb_{15}$  硫系玻璃基质,运用式(1)和式(2)计算空芯光子带隙光纤的限制损耗和基模有效模场面积.光纤的限制损耗和有效模场面积随着纤芯空气孔直径的变化而变化,如图5.由图可知,  $D_{core} = 8.5 \mu m$  时,  $Loss = 0.022 \text{ dB/m}$ ,  $A_{eff} = 75.7 \mu m^2$ ;  $D_{core} = 9.5 \mu m$  时,  $Loss = 0.057 \text{ dB/m}$ ,  $A_{eff} = 55.318 \mu m^2$ ,参量值均较小.进一步优化参量,取  $D_{core} = 8.6 \sim 9.6 \mu m$ ,如图6,可得当  $D_{core} = 9.2 \mu m$  时,  $Loss = 0.00472 \text{ dB/m}$ ,  $A_{eff} = 58.046 \mu m^2$  (光纤纤芯的空气孔面积为:  $S = \pi r^2 = 66.476 \mu m^2$ ),光纤的限制损耗和有效模场面积均为最低值,表明在对应结构的光子晶体光纤中,传输的激光恰好位于光纤形成的完全光子带隙内.

空芯光子带隙光纤的限制损耗和基模模场面积随传输激光波长的变化规律如图7.取  $\Lambda = 3.5 \mu m$ ,  $D_{core} = 9.2 \mu m$ ,  $d/\Lambda = 0.80$ ,传输波长  $\lambda = 3.6 \sim 4.6 \mu m$ .由图可知  $\lambda = 3.7 \mu m$  时,  $Loss = 23137.52 \text{ dB/m}$ ,  $A_{eff} = 734.876 \mu m^2$ ;  $\lambda = 4.5 \mu m$  时,  $Loss = 30067.35 \text{ dB/m}$ ,  $A_{eff} = 929.348 \mu m^2$ .这两种波长的激光在光纤中的限制损耗远远大于在  $4.3 \mu m$  处的基模损耗(相差7个数量级),有效基模模场面积远远大于光纤的纤芯空气孔面积,所以此时所传输波长的激光不在光纤形成的完全光子带隙内,即该光纤的结构参量不适用于传输波长的  $3.7 \mu m$  和  $4.5 \mu m$  的激光.在光纤形成的完全光子带隙外,激光传输过程中能量泄漏到包层空气孔中传输,传输一段距离后激光能量会全部或大部分泄漏而无法重新回到光纤纤芯空气孔中,此时光纤的限制损耗和基模模场面积很大,不适合用于激光能量传输.

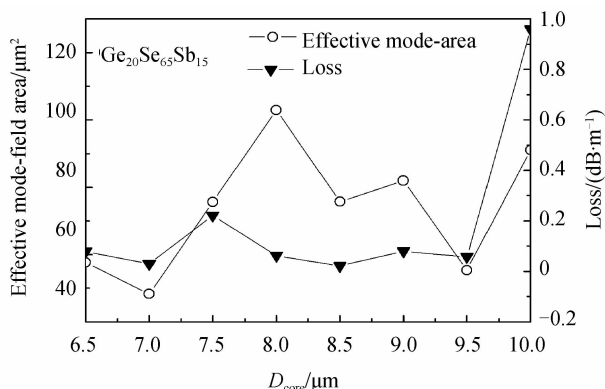


图5  $D_{\text{core}} = 6.5 \sim 10.0 \mu\text{m}$  时,  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  空芯光子带隙光纤限制损耗和有效模场面积随纤芯直径的变化规律曲线

Fig. 5 When  $D_{\text{core}} = 6.5 \sim 10.0 \mu\text{m}$ ,  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  hollow-core PCF relation of confinement loss and effective mode-field area with different fiber core diameter

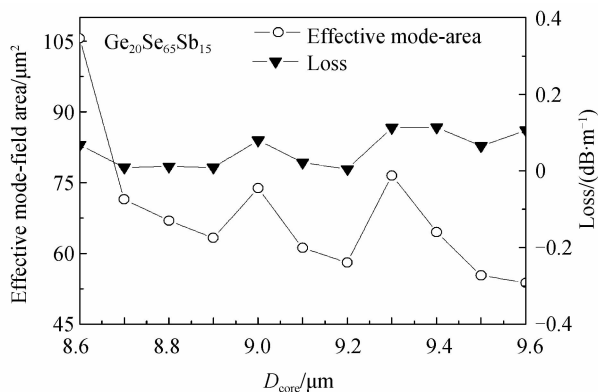


图6  $D_{\text{core}} = 8.6 \sim 9.6 \mu\text{m}$  时,  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  空芯光子带隙光纤限制损耗和有效模场面积随纤芯直径的变化规律曲线

Fig. 6 When  $D_{\text{core}} = 8.6 \sim 9.6 \mu\text{m}$ ,  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  hollow-core PCF relation of confinement loss and effective mode-field area with different fiber core diameter

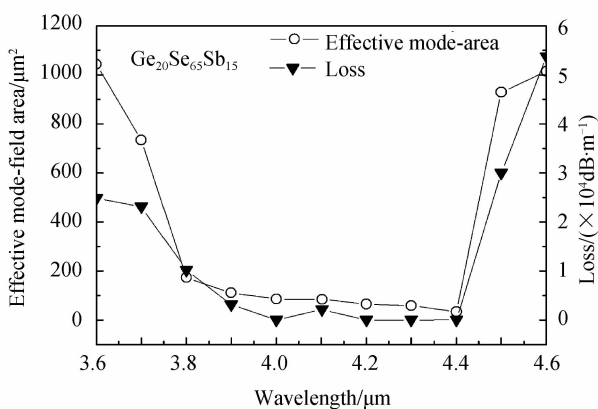


图7  $\lambda = 3.7 \sim 4.5 \mu\text{m}$  时,  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  空芯光子带隙光纤限制损耗和有效模场面积随传输波长的变化规律曲线

Fig. 7 When  $\lambda = 3.7 \sim 4.5 \mu\text{m}$ ,  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  hollow-core PCF relation of confinement loss and effective mode-field area with different wavelength

### 3 结论

本文通过比较不同硫系玻璃组分及不同光纤空气填充率,分析了其带隙形成、光纤基模限制损耗及基模有效模场面积特性.在三种玻璃组分均能形成完全带隙的情况下,选取具有完全光子带隙数目多且带隙宽度较大的无As环保型  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  硫系玻璃作为光纤基质材料.设计了一种适用于在飞行器尾焰能量集中波长  $4.3 \mu\text{m}$  处的高功率激光能量传输硫系空芯光子带隙型光纤.通过 PWM 和 FEM 优化光纤结构参量,光纤在  $4.3 \mu\text{m}$  存在低限制损耗传输窗口.当  $\Lambda = 3.5 \mu\text{m}$ ,  $D_{\text{core}} = 9.2 \mu\text{m}$ ,  $N_r = 7$ ,  $d/\Lambda = 0.80$ , 无As环保型硫系  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{65}\text{Sb}_{15}$  玻璃为光纤基质在  $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$  处的限制损耗为  $0.00472 \text{ dB/m}$ , 模场面积小于光纤纤芯面积  $58.046 \mu\text{m}^2$ . 研究表明,该结构的硫系空芯光子带隙光纤适用于传输  $4.3 \mu\text{m}$  处的高功率激光.

#### 参考文献

- [1] ZHANG Xin, GUO Yi-zhong, WAN Xin-min, et al. Simulation of early warning and detection capability of ballistic missile in boosting phase based on infrared characteristic[J]. *Shipboard Electronic Count Ermeasure*, 2010, **33**(5): 92-95. 张鑫, 郭宜忠, 万新敏, 等. 基于红外特性的弹道导弹助推段预警探测能力仿真[J]. 舰船电子对抗, 2010, **33**(5): 92-95.
- [2] XIE Xu-fen, REN Zhi-bin, CAO Xiao-yan, et al. Model building and analyses on infrared radiation characteristics of exhaust plume of cruise missile [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(4): 70-74. 谢蓄芬, 任智斌, 曹小燕, 等. 巡航导弹尾焰红外辐射特性建模及分析[J]. 光电工程, 2009, **36**(4): 70-74.
- [3] EDGAR F J, KLAUS S. Investigation of temperature and gas concentration distributions in hot exhausts (airplanes and burners) by scanning imaging FTIR spectrometry[C]. SPIE, (S0277-786X), 2005, **5979**(10): 365-376.
- [4] DAI Shi-xun, YU Xing-yan. Research progress of chalcogenide glass photonic crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 1-10. 戴世勋, 於杏燕. 硫系玻璃光子晶体光纤研究进展[J]. 激光与光电子学, 2011, **48**(9): 1-10.
- [5] SHAW L, SANGHERA J, AGGARWAL I, et al. As-S and As-Se based photonic band gap fiber for IR laser transmission [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(25): 3455-3460.
- [6] SANGHERA J S, SHAW L B, PUREZA P, et al. Nonlinear properties of chalcogenide glass fibers [J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2007, **1**(08): 2148-2155.
- [7] DESEVEDAVY F, RENVERSEZ G, TROLES J, et al. Chalcogenide glass hollow core photonic crystal fibers [J]. *Optical Materials*, 2010, **32**(06): 1532-1539.
- [8] LLI Shu-guang. Band-gaps of the chalcogenide glass hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, **55**(28): 114204-1~114204-4.
- [9] LIU Yong-xing, ZHANG Pei-qing, XU Yin-sheng, et al. Preparation of  $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$  chalcogenide glass and designing for a low-loss hollow-core photonic crystal fiber at  $10.6 \mu\text{m}$  [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1016004-1~1016004-6. 刘永兴, 张培晴, 许银生, 等.  $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$  硫系玻璃的制备及其  $10.6 \mu\text{m}$  低损耗空芯光子带隙光纤的设计[J]. 光学学报,

- 2012, **32**(10): 1016004-1~1016004-6.
- [10] ZHANG Chi, HU Ming-lie, SONG You-jian, *et al.* An Yb-doped large-mode-area photonic crystal fiber mode-locking laser with free output coupler [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(11): 7727-7733.  
张驰, 胡明列, 宋有建, 等. 自由耦合输出的大模场面积光子晶体光纤锁模激光器[J]. *物理学报*, 2009, **58**(11): 7727-7733.
- [11] WANG Dou-dou, WANG Li-li. Low loss and high birefringence topas photonic bandgap fiber at terahertz frequency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 06~0606002-5.  
王豆豆, 王丽莉. 低损耗高双折射太赫兹 Topas 光子带隙光纤[J]. *光子学报*, 2014, **43**(6): 06~0606002-5.
- [12] CAO Feng-zhen, ZHANG Pei-qing, DAI Shi-xun, *et al.* 3~5 Microns chalcogenide photonic crystal fiber with broadband ultra-low flattened dispersion [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 06~0606003-6.  
曹凤珍, 张培晴, 戴世勋, 等. 3~5 $\mu\text{m}$  宽带超低色散平坦硫系光子晶体光纤[J]. *光子学报*, 2014, **43**(6): 06~0606003-6.
- [13] BRECHET F, MARCOU J, PAGNOUX D, *et al.* Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers, by the finite element method[J]. *Optical Fiber Technology*, 2000, **6**(2): 181-191.
- [14] MENG Jia, HOU Lan-tian. Analysis of the special hollow-core photonic crystal fibre by finite element method [J]. *Chinese Physics B*, 2008, **17**(10): 3779-3784.
- [15] HAXHA S, ADEMGIL H. Novel design of photonic crystal fibres with low confinement losses, nearly zero ultra-flatted chromatic dispersion, negative chromatic dispersion and improved effective mode area [J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(2): 278-286.
- [16] YI Chang-shen, DAI Shi-xun. Design of a novel single-mode large mode area infrared chalcogenide glass photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(8): 84206-1~84206-7.  
易昌申, 戴世勋. 新型单模大模场红外硫系玻璃光子晶体光纤设计研究[J]. *物理学报*, 2013, **62**(8): 84206-1~84206-7.
- [17] DAI Shi-xun, CHEN Hui-guang, LI Mao-zhong, *et al.* Halcogenide glasses and their infrared optical applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4): 847-852.  
戴世勋, 陈惠广, 李茂忠, 等. 硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(4): 847-852.
- [18] CARLIE N, ANHEIER NC JR, QIAO HA, *et al.* Measurement of the refractive index dispersion of As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> bulk glass and thin films prior to and after laser irradiation and annealing using prism coupling in the near- and mid-infrared spectral range[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, **82**(5): 53103-1~53103-7.
- [19] LIU Yong-Xing, ZHANG Pei-qing, XU Yin-sheng, *et al.* Dispersion properties of Ge<sub>20</sub>Sb<sub>15</sub>Se<sub>65</sub> chalcogenide glass photonic crystal fiber for mid-IR region[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 516-521.  
刘永兴, 张培晴, 许银生, 等. Ge<sub>20</sub>Sb<sub>15</sub>Se<sub>65</sub> 硫系玻璃光子晶体光纤的中红外色散特性[J]. *光子学报*, 2012, **41**(5): 516-521.
- [20] CAO Ying, NIE Qiu-hua, XU Tie-feng, *et al.* Optical properties and structure of Ge<sub>28</sub>Sb<sub>6</sub>S<sub>(66-x)</sub>Se<sub>x</sub> glasses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **37**(007): 1153-1157.  
曹莹, 聂秋华, 徐铁峰, 等. Ge<sub>28</sub>Sb<sub>6</sub>S<sub>(66-x)</sub>Se<sub>x</sub> 玻璃系统光学特性与结构[J]. *光子学报*, 2010, **37**(007): 1153-1157.
- [21] WEIBLEN R, DOCHERTY A, HU J, *et al.* Calculation of the expected bandwidth for a mid-infrared super continuum source based on As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> chalcogenide photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 26666-26674.