

Ge₃₀Sb₈Se₆₂ 硫系玻璃的制备及其 10.6 μm 低损耗空芯光子带隙光纤的设计

刘永兴 张培晴 许银生 王训四 戴世勋 聂秋华 徐铁峰

(宁波大学信息科学与工程学院红外材料与器件实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要 硫系玻璃光子晶体光纤在中远红外激光传输领域具有广阔的应用前景。制备了红外波段具有优良透过特性的 Ge₃₀Sb₈Se₆₂ 硫系玻璃, 并以此为基质材料设计了一种适合于高功率中红外激光传输的带隙型光子晶体光纤。利用平面波展开法和有限元法分析了不同结构下该光纤的光子带隙、模场面积和限制损耗特性。通过优化光纤的结构参数, 获得了在 10.6 μm 处限制损耗小于 0.1 dB/m 的大模场(模场面积大于 100 μm²)光子晶体光纤。

关键词 光纤光学; 硫系玻璃; 光子晶体光纤; 红外激光传输; 低损耗

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1016004

Preparation of Ge₃₀Sb₈Se₆₂ Chalcogenide Glass and Designing for a Low-Loss Hollow-Core Photonic Crystal Fiber at 10.6 μm

Liu Yongxing Zhang Peiqing Xu Yinsheng Wang Xunsi

Dai Shixun Nie Qiuhua Xu Tiefeng

(Laboratory of Infrared Materials and Devices, College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract Chalcogenide glass photonic crystal fiber is expected to have important applications in the field of mid-infrared laser transmission. The Ge₃₀Sb₈Se₆₂ chalcogenide glass with excellent transparency in mid-infrared region is prepared. Based on this chalcogenide glass, a band-gap photonic crystal fiber is designed, which suits high power laser transmission. With plane wave expansion method and finite element method, photonic band gap, mode-field area and confinement loss of the designed photonic crystal fiber are systematically studied. By optimizing the structural parameters of fiber, photonic crystal fiber with confinement loss less than 0.1 dB/m and effective mode-field area larger than 100 μm² at 10.6 μm is obtained.

Key words fiber optics; chalcogenide glass; photonic crystal fiber; infrared laser transmission; low loss

OCIS codes 060.2290; 060.2390

1 引 言

随着红外探测技术与激光技术的不断发展, 3~20 μm 的中波及长波红外激光越来越受人们的关注。这一波段不仅包含了衰减极小的大气第二窗口(3~5 μm)和第三窗口(8~12 μm), 而且还覆盖了

众多原子及分子的吸收峰, 该波段的激光在红外光谱学、遥感、医疗、环保、激光加工、激光雷达和激光武器等诸多领域都有重要的应用价值和前景^[1~6]。以石英基质为主的光纤已经在可见及近红外激光传输中发挥了巨大的作用, 但是受石英材料红外截止波

收稿日期: 2012-04-12; 收到修改稿日期: 2012-05-23

基金项目: 国家科技部重大国际合作项目(2001DFA12040)、国家 973 计划项目子课题(2012CB722703)、国家自然科学基金(61177087, 61107047)、教育部新世纪优秀人才项目(NCET-10-0976)、浙江省自然科学基金项目(LQ12F05004)、浙江省杰出青年基金项目(R1101263)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队项目(2009B21007)和宁波大学王宽诚幸福基金资助课题。

作者简介: 刘永兴(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事新型光子晶体光纤方面的研究。

E-mail: liuyongxing@mail.nbu.edu.cn

导师简介: 戴世勋(1974—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光功能玻璃材料及器件等方面的研究。

E-mail: daishixun@nbu.edu.cn(通信联系人)

长的限制,其工作波长一般不超过 $2\ \mu\text{m}$,近年来非石英材料及其光纤的研究逐渐受到人们的重视^[7]。

硫系玻璃是一类在中远红外波段具有优良透过性能的红外材料(依据组成不同,其透过范围可从 $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$ 延伸到 $12\sim 25\ \mu\text{m}$),且其机械强度高,化学稳定性好,硫系玻璃已被成功用于制备低传输损耗的红外光纤^[8]。然而传统结构的光纤在传输高功率红外激光时,由于材料吸收和非线性效应的影响,不仅会导致激光传输质量的下降,还可能造成永久性的光纤损伤,从而限制了激光传输功率的进一步提高。使用带隙型光子晶体光纤是提升光纤激光传输能力的有效途径,由于其利用中心空气孔导光^[9~11],不受传统光纤本征吸收和瑞利散射的影响,大大减小了材料的光学损耗和非线性^[12],使其具有低的传输损耗和高的非线性损伤阈值。此外,由于光子带隙的存在,此类光纤还具有灵活的色散控制、特定传输波长选择、模场面积调节等特性^[13,14]。

带隙型光子晶体光纤因其独特的光学特性在高功率激光能量传输、超短光脉冲的色散与非线性传输控制和光与物质的非线性相互作用等方面表现出巨大的应用潜力^[15~19]。在带隙型光子晶体包层孔中可方便地填充其他材料(如具有吸收或温敏特性的材料),也可以应用于传感器等领域。然而目前带隙型光子晶体光纤主要集中在以石英为基质的材料中,工作波段范围也多局限在可见光到近红外区域,对于红外工作波段的新型硫系玻璃红外带隙型光子晶体光纤的研究甚少。目前,仅在含 As 的 As_2S_3 , As_2Se_3 等玻璃系统中^[12]有关于带隙型光子晶体光纤中传输损耗、色散控制和群速度特性等少数理论研究报道^[20~23]。因此有必要开展新型环境友好型无 As 组分的硫系玻璃带隙型光子晶体光纤的理论设计研究。

本文利用真空熔融淬冷法^[24]制备了一种无 As 环保型 $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ 硫系玻璃。测量了其折射率、红外透过光谱和热学性能参数,以此为基质材料,理论设计了一种较易于实验制备的低限制损耗带隙型光子晶体光纤结构。利用平面波展开法(PWM)和有限元法(FEM)系统研究了光纤结构参数对传输波长、传输限制损耗以及模场分布的影响。最终经参数优化获得了在 $10.6\ \mu\text{m}$ 附近限制损耗低于 $0.1\ \text{dB/m}$ 的宽带低限制损耗带隙型光子晶体光纤。此光纤模场面积 A_{eff} 大于 $100\ \mu\text{m}^2$,具有较高的红外激光传输能力。

2 $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ 硫系玻璃材料制备与性能测试

采用真空熔融淬冷法制备了 $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ 基质硫系玻璃,具体制备过程可参见文献^[24]。利用美国 TA 公司 Q2000 型号差热分析仪(DSC)测量玻璃的转变温度和软化温度,以 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率,测量得到制备的玻璃的转变温度 T_g 为 $270\ ^\circ\text{C}$,玻璃软化温度 T_x 为 $429\ ^\circ\text{C}$, $\Delta T = T_x - T_g = 159\ ^\circ\text{C}$,如图 1(a)所示,已有研究表明:当 $\Delta T > 100\ ^\circ\text{C}$ 时,玻璃材料便可用于拉制光纤^[25,26]。由此可见,本文制备的硫系玻璃具有良好的热稳定性,有利于光纤的拉制。用美国 Nicolet 公司 380 型号傅里叶红外光谱仪(FTIR)测试其透过光谱,发现 $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ 玻璃在 $2.5\sim 15\ \mu\text{m}$ 的波长范围内具有极好的透过性,如图 1(b)所示,适合传输中远红外高能激光(如 $10.6\ \mu\text{m}$ 波段的 CO_2 激光等)。用西安应用光学研究所 RI98A 型红外材料折射率测试仪测量样品在不同波长下的折射率,结果显示 $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ 玻璃在 $2\sim 10\ \mu\text{m}$ 的折射率均高于 2.49,如表 1 所示,这利

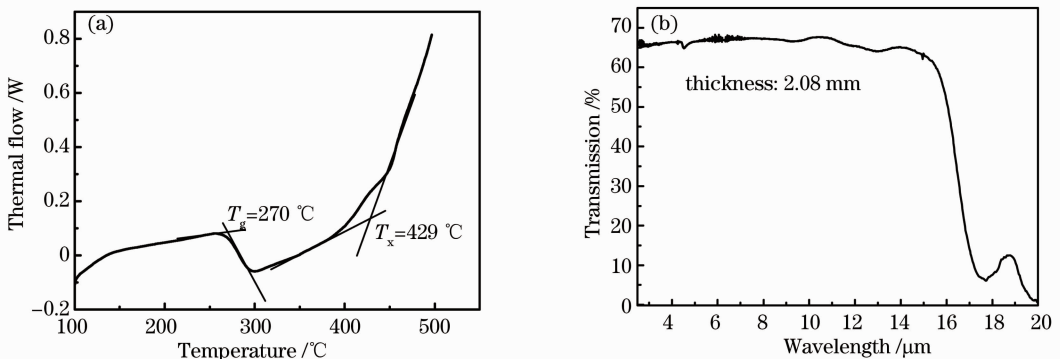


图 1 $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ 硫系玻璃的(a)差热分析曲线和(b)红外透过光谱

Fig. 1 $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ glass's (a) differential thermal analysis curve and (b) infrared spectrum

表 1 $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ 不同波长下的折射率Table 1 Refractive index of $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ chalcogenide glass in different wavelengths

Wavelength / μm	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Refractive index	2.5267	2.5148	2.5100	2.5071	2.5047	2.5024	2.4999	2.4973	2.4944

于完全光子带隙的形成,可设计传输特定波长的带隙型光子晶体光纤结构。

3 低限制损耗光纤的设计与优化

3.1 $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ 硫系玻璃三角晶格带隙特性

设计的带隙型光子晶体光纤结构如图 2(a) 所示,为三角格子空气孔阵列结构。图中黑色部分为空气孔,白色部分为硫系玻璃基质材料,空气孔间距为 Λ ,包层空气孔的直径为 d ,纤芯空气孔的直径为 D_{core} ,由光纤的几何结构计算对应空气孔填充率为

$$f = \frac{A_{\text{air}}}{A_{\text{cell}}} = \frac{\pi(d/2)^2}{\sqrt{3}/2\Lambda^2}. \quad (1)$$

利用 FEM 计算光纤中基模的模场分布如图 2(b) 所示,对应光纤结构参数为 $D_{\text{core}} = 20\ \mu\text{m}$, $d = 6.75\ \mu\text{m}$, $\Lambda = 9.30\ \mu\text{m}$,模场分布图显示光场能量被很好地限

制在光纤的纤芯中。对于带隙型光子晶体光纤,其允许的传输波长仅存在于光子带隙中,为了获得可传输特定波长的低损耗光纤的最优化结构参数,利用 PWM^[27] 系统地研究了光纤的带隙图谱随结构参数的变化规律。分析了不同空气填充率下 ($40\% \leq f \leq 90\%$) 光纤的带隙结构,如图 3 所示,图中横轴统一为归一化传播常数 $\beta\Lambda$,纵轴为归一化频率 $k\Lambda$ 。图中空气线 $k = \beta$ (即折射率 $n = 1$) 代表纤芯空气孔中容许的传播模式。为使传播的光场能量限制在纤芯空气孔中光场模式需位于空气线附近,即光子带隙与空气线交汇的模式。在图 3 中,带隙宽度 ($\beta\Lambda$) 与空气线相交的部分越大,则给定的结构参数下的纤芯中容许的传播模式越多,光场越容易限制在空气孔中传播。带隙高度 ($k\Lambda$) 越大则所容许传输的光谱范围越宽,更容易实现光能的宽带低损耗传输^[22]。

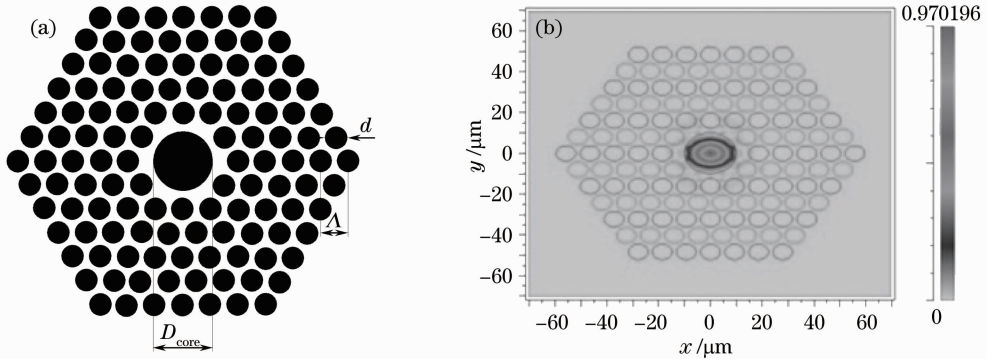


图 2 带隙型光子晶体光纤的(a)结构示意图;(b)基模模场分布

Fig. 2 (a) Structure of band-gap photonic crystal fiber; (b) mode-field distribution of its fundamental mode

对比光纤在不同填充率下的能带结构图发现,当空气的填充率小于 40% 时,如图 3(a) 所示,空气线和带隙图无相交部分,此时光纤中不存在纤芯空气孔中传导的模式。提高空气孔的填充率至 $50\% \sim 60\%$,如图 3(b)、(c) 所示,在归一化传播常数 $4.5 < \beta\Lambda < 7$ 的区域中出现了多个带隙与空气线的交叠区域,此时可以形成在空气孔中传播的模式。随着空气填充率的逐渐增大,空气线与带隙的交叠区域明显减少,如图 3(e) 所示,当填充率约为 80% 时,带隙和空气线几乎不存在交叠区域。然而当填充率进一步提高时,如图 3(f) 所示,当填充率达到 90% 时带

隙图中又出现几个大的带隙与空气线相交。通过分析带隙随填充率的变化规律,发现硫系玻璃光子晶体光纤可以根据需要调整光纤参数选择特定的传输波长。设计可用于传输 $10.6\ \mu\text{m}$ 高能红外激光的硫系玻璃光子晶体光纤,考虑到高填充率下 ($f > 90\%$),硫系玻璃孔壁太薄使得光纤十分脆弱,加工难度较大,所以选择填充率约为 60% 做光纤结构参数的进一步优化以获得大模场低限制损耗红外传输光纤。对应 5 层空气孔结构的带隙型光子晶体光纤,当填充率为 60% 时,其基模模场分布如图 2(b) 所示,基模的能量基本限制在中心空气孔中。

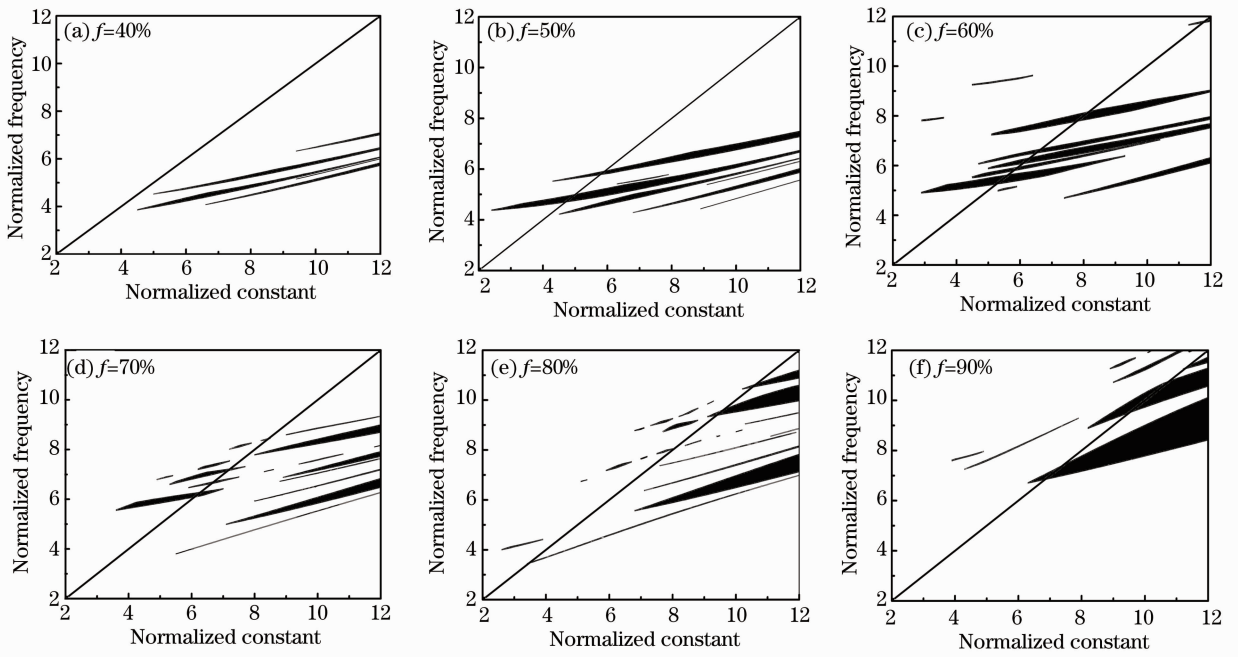


图 3 $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ 玻璃三角晶格不同填充率下的带隙分布图

Fig. 3 Band gaps of $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ glass triangular lattice with different fill rates

3.2 不同填充率下的基模限制损耗与模场分布

忽略光纤材料的本征吸收, 光纤的限制损耗可以表示为^[12]

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

式中 λ 为传输波长, $\text{Im } n_{\text{eff}}$ 为有效折射率的虚部。利用 FEM 计算光纤的有效折射率^[28,29], 通过(2)式可获得到光纤的限制损耗。为使光纤传输激光波长位于 $10.6 \mu\text{m}$ 附近, 根据图 3 中计算得到的光子带隙结构, 选择 $\Lambda = 9.28 \mu\text{m}$, $D_{\text{core}} = 24 \mu\text{m}$ 。在 $f = 0.6$ 附近进一步优化填充率, 以获得最低限制损耗的光纤结构。在图 4 中, 模拟了光纤的限制损耗与填充率的变化规律, 对于 $10.6 \mu\text{m}$ 的传输波长, 当填充率为 $0.58 \sim 0.62$ 时限制损耗相对最低, 表明在对应结构的光子晶体光纤中, 传输光恰好位于完全光子带隙内。当填充率偏离此范围, 传输光处于完全光子带隙外或仅存在膺带隙, 导致损耗进一步增加无法实现有效的光场能量传输。此外, 在图 4 中, 通过对光场模式的计算, 发现随着空气填充率的变化, 传输基模的模场面积也随之发生变化。当传输光在光纤光子带隙的中间位置时, 能量更集中在纤芯的中心区域, 从包层中泄露的能量较少, 模场面积相对较小; 在带隙外, 光的能量部分泄露到光纤的包层中传播, 模场面积相对较大。

进一步分析宽波段激光在不同空气孔填充率下

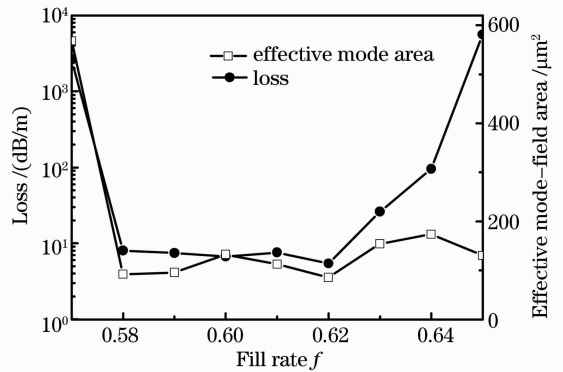


图 4 中心波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 时最低限制损耗及其对应的模场面积随填充率的变化关系

Fig. 4 Lowest confinement loss and corresponding effective mode-field area versus fill rate in the wavelength of $10.6 \mu\text{m}$ 的限制损耗, 如图 5 所示, 对于确定的填充率, 由于光子带隙的存在, 不同波长激光的限制损耗存在巨大的差别, 但均存在若干低损耗传输窗口。如对于 $f = 0.61$ 的光纤结构, 激光在 $10.3 \sim 11.0 \mu\text{m}$ 均能保持低损耗传输。随着填充率的变化, 低损耗窗随之移动。当填充率增大时, 各低损耗窗口向短波方向移动, 与光子带隙的变化规律是一致的。当 $f = 0.61$ 时, $10.6 \mu\text{m}$ 的光恰好处在带隙的正中央, 故在设计传输 $10.6 \mu\text{m}$ 红外激光时, 选择填充率约为 0.61 , 并且此光纤结构在实验制备中也相对容易。

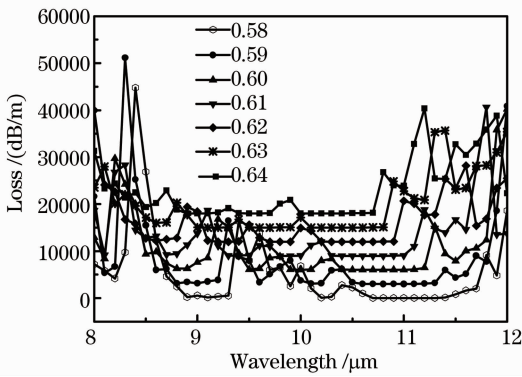


图 5 不同填充率下光纤最低限制损耗与波长的关系曲线

Fig. 5 Relation of lowest confinement loss with wavelength based on different fill rates

3.3 不同中心空气孔直径及空气孔层数下的限制损耗与模场

为了获得最优化的低限制损耗硫系玻璃光子晶体光纤,进一步研究了光纤结构中纤芯空气孔直径的变化对限制损耗和模场面积的影响规律。选择光纤包层数 N_r 仅为 5 层的空气孔结构。为了保证纤芯空气孔不与包层的空气孔相互交叠,中心空气孔直径 D_{core} 应该满足 $D_{\text{core}} \leq (2\sqrt{3} - f)\Lambda$, 对应 $f = 0.61$ 时要求 $D_{\text{core}} < 26 \mu\text{m}$ 。在图 6 中,分别模拟了纤芯直径从 $18 \mu\text{m}$ 变化到 $24 \mu\text{m}$ 时光纤的基模限制损耗和模场分布情况,模拟结果显示当改变纤芯空气孔直径时,最低限制损耗随之波动,模场面积也随之变化,且模场面积与限制损耗具有相似的变化规律,但变化幅度均都在同一量级范围内。当纤芯的直径为 $24 \mu\text{m}$ 时光纤的损耗达到最小值,小于 1 dB/m 。由于能量被限制在中心的空气孔中传播,模场不再绝对依赖于纤芯的大小,故此时的模场面积并不是最大

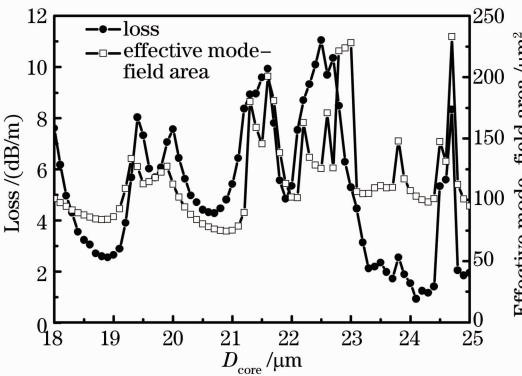


图 6 最低限制损耗和对应的模场面积随中心空气孔直径的变化曲线

Fig. 6 Lowest confinement loss and corresponding effective mode-field area versus different core diameters

的,约为 $100 \mu\text{m}^2$,但仍明显优于传统结构光纤。当增加包层空气孔层数后,光纤中的限制损耗明显下降。如图 7 所示,当 $N_r = 5$ 时, $10.6 \mu\text{m}$ 附近光场的最低限制损耗仅为 1 dB/m ,当空气层数增大到 6 时,最低限制损耗可达到 0.1 dB/m ,继续增加空气孔层数至 8,最低限制损耗可降低至 10^{-3} dB/m 。

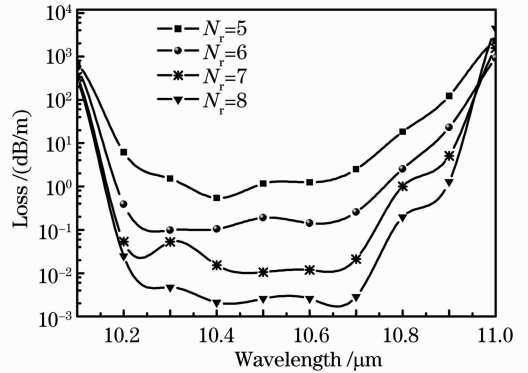


图 7 最低限制损耗与包层空气层的变化关系

Fig. 7 Dependence on lowest confinement loss on the number of air layers

4 结 论

制备了无 As 环保型 $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ 硫系玻璃,实验测试其具有良好的红外透过性能,较高的折射率和优良的热学稳定性,可用于制备红外光子晶体光纤。以此玻璃为基质材料,理论设计了一种适合于高功率中红外激光传输的带隙型光子晶体光纤。通过 PWM 和 FEM 优化光纤的结构参数,发现当空气孔填充率为 0.61 时,光纤在 $10.6 \mu\text{m}$ 附近存在低限制损耗传输窗口。对应 $\Lambda = 9.30 \mu\text{m}$, $f = 0.61$, $D_{\text{core}} = 24 \mu\text{m}$, $N_r = 6$ 时,光纤在 $10.6 \mu\text{m}$ 附近限制损耗小于 0.1 dB/m ,模场面积大于 $100 \mu\text{m}^2$ 。以上结果表明此带隙型硫系光子晶体光纤可用于传输 $10.6 \mu\text{m}$ 的高功率激光。

参 考 文 献

- 1 S. Février, D. D. Gaponov, P. Roy *et al.*. High-power photonic-bandgap fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 989~991
- 2 T. Ritari, J. Tuominen, H. Ludvigsen *et al.*. Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(17): 4080~4087
- 3 K. Uchiyama, T. Morioka, M. Saruwatari *et al.*. Error free all-optical demultiplexing using a chalcogenide glass fibre based nonlinear optical loop mirror [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(17): 1601~1602
- 4 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
- 5 Gao Yongfang, Shi Jiaming, Zhao Dapeng *et al.*. Design and fabrication of a kind of far infrared and 10.6 μm laser band compatible camouflage material based on photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0616001
高永芳, 时家明, 赵大鹏等. 一种基于光子晶体的远红外与10.6 μm 激光兼容伪装材料的设计与制备[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0616001
- 6 Yu Xingyan, Dai Shixun, Zhou Yaxun *et al.*. Theoretical studies on mid-infrared gain characteristics of erbium-doped chalcogenide glass fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0105003
於杏燕, 戴世勋, 周亚训等. 掺铒硫系玻璃光纤的中红外增益特性模拟研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0105003
- 7 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
- 8 Wang Xunsi, Liang Xiaowei, Zhu Mingxing *et al.*. Optic effect of KCl on $\text{GeSe}_2\text{-Ga}_2\text{S}_3$ chalcogenide glasses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2047~2052
王训四, 梁小伟, 朱明星等. KCl对 $\text{GeSe}_2\text{-Ga}_2\text{S}_3$ 硫系玻璃光学性能的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2047~2052
- 9 T. M. Monro, Y. D. West, D. W. Hewak *et al.*. Chalcogenide holey fibres[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(24): 1998~2000
- 10 J. Knight, J. Broeng, T. Birks *et al.*. Photonic band gap guidance in optical fibers [J]. *Science*, 1998, **282** (5393): 1476~1478
- 11 R. Cregan, B. Mangan, J. Knight *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999, **285**(5433): 1537~1539
- 12 F. Désévéday, G. Renversez, J. Troles *et al.*. Chalcogenide glass hollow core photonic crystal fibers[J]. *Optical Materials*, 2010, **32**(11): 1532~1539
- 13 H. Nguyen, K. Finsterbusch, D. Moss *et al.*. Dispersion in nonlinear figure of merit of As_2Se_3 chalcogenide fibre [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(10): 571~572
- 14 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
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
- 15 M. Tefelska, S. Ertman, T. Wolinski *et al.*. Large area multimode photonic band gap propagation in photonic liquid crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012, **24**(8): 631~633
- 16 R. J. Noble, J. E. Spencer, B. T. Kuhlmey. Hollow-core photonic band gap fibers for particle acceleration[J]. *Phys. Rev. Special Topics-Accelerators and Beams*, 2011, **14**(12): 121303
- 17 L. V. Doronina-Amitonova, I. V. Fedotov, O. I. Ivashkina *et al.*. Photonic-crystal-fiber platform for multicolor multilabel neurophotonic studies[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(25): 253706
- 18 L. Chen, G. J. Pearce, T. A. Birks *et al.*. Guidance in Kagome-like photonic crystal fibres I: analysis of an ideal fibre structure[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(7): 6945~6956
- 19 L. Zhang, S. G. Li, Y. Y. Yao *et al.*. Properties of high birefringence chalcogenide glass holey fibre for mid-infrared transparency[J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(3): 035207
- 20 T. Engeness, M. Ibanescu, S. Johnson *et al.*. Dispersion tailoring and compensation by modal interactions in OmniGuide fibers[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(10): 1175~1196
- 21 J. Lægsgaard. Zero-velocity solitons in high-index photonic crystal fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(1): 37~44
- 22 S. G. Li, H. S. Zhou, G. B. Yin. Bandgaps of the chalcogenide glass hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(11): 114204
- 23 A. F. Oskooi, J. Joannopoulos, S. G. Johnson. Zero-group-velocity modes in chalcogenide holey photonic-crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(12): 10082~10090
- 24 Lan Jianhua, Xu Tiefeng, Nie Qiuhua *et al.*. Effect of CsCl content on crystallization characteristics and properties of infrared transmitting of $\text{GeSe}_2\text{-Sb}_2\text{Se}_3$ glasses [J]. *J. Chinese Ceramic Society*, 2009, **37**(4): 568~573
兰建花, 徐铁峰, 聂秋华等. 氯化铯对 $\text{GeSe}_2\text{-Sb}_2\text{Se}_3$ 玻璃的析晶及红外透过性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2009, **37**(4): 568~573
- 25 Sun Jie, Nie Qiuhua, Wang Xunsi *et al.*. Reaserch on thermal and optical properties of novel Ge-Te-Se-Sn far infrared transmitting chalcogenide glasses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1116003
孙杰, 聂秋华, 王训四等. 新型远红外Ge-Te-Se-Sn硫系玻璃的热学与光学性质研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1116003
- 26 J. Wang, E. Vogel, E. Snitzer. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices[J]. *Optical Materials*, 1994, **3**(3): 187~203
- 27 R. Weiblen, A. Docherty, J. Hu *et al.*. Calculation of the expected bandwidth for a mid-infrared supercontinuum source based on As_2S_3 chalcogenide photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26666~26674
- 28 F. Brechet, J. Marcou, D. Pagnoux *et al.*. Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers, by the finite element method [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2000, **6**(2): 181~191
- 29 J. Meng, L. T. Hou, G. Y. Zhou *et al.*. Analysis of the special hollow-core photonic crystal fibre by finite element method[J]. *Chin. Phys. B*, 2008, **17** (10): 3779~3784

栏目编辑: 王晓琰