

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.09.016

2.0~25.0 μm 波段低限制损耗光子晶体光纤的设计

代问问, 陈凯, 褚奕祺, 罗巧霞, 王贤, 高伟清

(合肥工业大学 物理学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:针对 2.0~25.0 μm 波段传输的限制损耗问题,文章采用数值模拟方法研究影响碲基硫系光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)限制损耗的主要因素。光纤纤芯和包层材料采用 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 玻璃,通过改变纤芯直径、空气孔直径和空气孔层数等参数进行 2.0~25.0 μm 波段限制损耗的计算,结果表明,影响限制损耗的最大因素是纤芯直径,限制损耗随着纤芯直径和空气孔直径的增大而显著降低,随着空气孔层数的增加而降低;优化设计出一种低限制损耗的 PCF,结果表明,当纤芯直径和节距为 8.0 μm 、空气孔直径为 7.2 μm 、包层空气孔层数为 4 时,该 PCF 在 2.0~25.0 μm 波长范围的限制损耗低于 1.4×10^{-6} dB/m,满足低损耗传输要求。文章研究结果对 2.0~25.0 μm 波段光信号的传输具有一定的意义。

关键词:限制损耗;碲基硫系玻璃;光子晶体光纤(PCF);中远红外波段

中图分类号:O436

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)09-1262-06

Design of photonic crystal fiber with low confinement loss in 2.0-25.0 μm waveband

DAI Wenwen, CHEN Kai, CHU Yiqi, LUO Qiaoxia, WANG Xian, GAO Weiqing

(School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: In consideration of the confinement loss of transmission in the 2.0-25.0 μm waveband, the main factors affecting the confinement loss of tellurium-based chalcogenide glass photonic crystal fiber (PCF) are investigated by numerical simulation. The core and cladding materials of PCF are $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ glass. The confinement loss of PCF in 2.0-25.0 μm waveband is calculated by changing the core diameter, air hole diameter and number of air hole layer. The results show that the greatest factor affecting the confinement loss is the core diameter, and the confinement loss decreases significantly with the increase of the core diameter, air hole diameter and number of air hole layer. A PCF with low confinement loss is designed by optimizing the parameters. It is shown that when the core diameter and pitch are 8.0 μm , the diameter of air hole is 7.2 μm , and the number of air hole layer in the cladding layer is 4, the calculated confinement loss is lower than 1.4×10^{-6} dB/m in the spectral range of 2.0-25.0 μm , which meets the requirements of low loss transmission. The results are of significance for the transmission of optical signals in the spectral range of 2.0-25.0 μm .

Key words: confinement loss; tellurium-based chalcogenide glass; photonic crystal fiber (PCF); middle-and far-infrared waveband

通常 0.7~<2.0 μm 的光谱窗口被称为近红外区域,2.0~<15.0 μm 的被称为中红外区域,15.0~<1 000.0 μm 的被称为远红外区域^[1]。电磁波谱的中远红外区域(2.0~25.0 μm)

收稿日期:2022-04-06;修回日期:2022-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61875052; 61905059; 62105087; 62105088);安徽省重点研发计划资助项目(202104a07020010);安徽省自然科学基金资助项目(1908085QF273; 2108085QF282)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2020HGTB0065; JZ2021HGTA0145; JZ2021HGQA0255; JZ2021HGTA0148)

作者简介:代问问(1996—),男,安徽淮北人,博士,合肥工业大学硕士生;

高伟清(1979—),男,安徽庐江人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: gaoweiqing@hfut.edu.cn.

非常重要,因为大多数分子(如 CH_4 、 CO 、 NO 、 NO_2)和温室气体等在这一区域都有它们的基本振动吸收带,且大多数分子的基态振动带在中红外区域比近红外区域强,因此,2.0~25.0 μm 波段被称为“分子指纹区”。中红外光谱区包含 3.0~5.0 μm 和 8.0~12.0 μm 2 个重要的大气窗口^[2],使得其在多光谱组织成像^[3]、热成像^[4]和光谱气体传感器^[5]等方面具有重要应用前景。

当中远红外光的传播介质为大气时,大气中 H_2O 和 CO_2 各组分的光谱表现出明显的吸收,在传播过程中会减弱光信号,因此,传输介质为大气时不适合 2.0~25.0 μm 全波段的光信号传输。光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)的发展为红外光传输提供了新的介质,在近红外区中,高纯度石英玻璃已被证明是一种理想的光传输材料。但是石英光纤在波长大于 3.0 μm 时吸收损耗很大,使其不适用于中远红外波长范围的应用^[6]。传输窗口更宽的软玻璃光纤是一个很好的选择,软玻璃光纤包括碲酸盐光纤^[7]、氟化物光纤^[8]和硫系光纤^[9]。碲酸盐光纤的红外透过范围略小于氟化物光纤,但非线性折射率远大于氟化物玻璃,碲酸盐光纤与另外 2 种光纤相比难以去除水杂质,因此波长在 3.3 μm 以后损耗较大,在中红外波段的应用受限;氟化物光纤在中红外波段具有较高的透明度,波长在 5.0 μm 以上损耗逐渐增大,因此碲酸盐光纤和氟化物光纤常用于传输 5.0 μm 以内的中红外信号。当移向更长光谱区时,含有硫 S、硒 Se、碲 Te 的硫系玻璃是一个很好的选择,因为它在 0.5~25.0 μm 的透射窗口内具有宽的透明度^[10]。硫基、硒基和碲基硫系光纤的光谱窗口为 0.5~12.0 μm 、1.0~15.0 μm 、1.5~25.0 μm ,覆盖了近、中、部分远红外波段^[10]。因为生命最重要的光谱特征包含了 H_2O (6.0 μm)、 O_3 (9.0 μm)和 CO_2 (16.0 μm)等,所以碲基硫系光纤在太阳系外类地行星的大气中寻找生命方面也具有巨大的潜力^[11]。

光子晶体光纤 PCF 可以通过改变其横截面的几何特性(如纤芯和空气孔的直径)来改变 PCF 的限制损耗、色散、模场面积等特性,其中低限制损耗光纤在长距离、大容量的光信号传输方面有着独特的优势。文献[12]设计了一种在 10.6 μm 波长处限制损耗小于 10^{-1} dB/m 的 $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ 玻璃 PCF;文献[13]设计了一种限制损耗接近于 10^1 dB/m 的双芯 PCF;文献[14]设计了限制损耗为 10^0 dB/m 数量级的全椭圆形空

气孔的双折射 PCF;文献[15]设计了一种限制损耗低于 10^{-8} dB/m 数量级的 PCF;文献[16]设计了限制损耗低至 10^{-7} dB/m 数量级对称椭圆空气孔缺陷的 PCF。实芯 PCF 是 2.0~25.0 μm 全波段光信号传输的首选介质,可以通过控制 PCF 的结构参数,即气孔的间距和直径来控制其光学性质。在实芯光纤中,限制损耗是影响信号传输的主要因素。

目前对中远红外波段限制损耗的研究还较少,而且所报道的主要集中在近中红外波段。因此,本文提出一种常见结构的低限制损耗的碲基硫系 PCF,通过改变纤芯直径、空气孔直径和空气孔层数等来研究 PCF 在 2.0~25.0 μm 波段的限制损耗。

1 基本理论和物理模型

1.1 基本理论

PCF 的各种损耗是由内在因素或外在因素造成,其中限制损耗是由 PCF 本身结构导致的。理论上 PCF 的包层具有无限个空气孔时,其传输是无损耗的,然而在制作中能够在光纤横截面上引入的空气孔是有限的^[17]。影响限制损耗的因素主要有纤芯直径、空气孔直径、空气孔层数等。在一个实心 PCF 中,光波被空气孔限制在纤芯区域,当纤芯对光波的限制不够时,光就从纤芯逃逸到包层中,这意味着空气孔直径与空气孔间距之间的比率必须足够大,才能使光波被有效地限制在纤芯中。为了准确分析限制损耗的大小以及消除边界条件的影响,可以通过增加完美匹配层(perfectly matching layer, PML)来吸收边界^[18]。在 PCF 最外层加入 PML,光波在纤芯中传输时,部分能量泄露到包层中,模式限制损耗 L_c (单位为 dB/m)可根据模式有效折射率 n_{eff} 的虚部计算得到^[19]:

$$L_c = 8.686 k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (1)$$

其中, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波数, λ 为透射波长。

下面利用有限元算法分析 PCF 限制损耗特性。

1.2 物理模型

本文所设计的 PCF 的横截面如图 1a 所示,纤芯和包层材料为 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ (下文称 GAST)玻璃,紫色区域表示 GAST 玻璃,灰色区域表示空气孔,最外层圆环为 PML。相邻 2 个空气孔间距为 Δ ,空气孔直径为 d ,纤芯直径为 d_0 ,纤芯被 3 层空气孔环绕,空气孔直径与空气孔间

距的比值定义为占空比 $\rho = d/\Lambda$ 。GAST 玻璃折射率 $n(\lambda)$ 随波长的变化趋势如图 1b 所示, $n(\lambda)$ 由塞米尔方程表示, 即

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_i \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \quad (2)$$

其中, $A_i, \lambda_i (i=1, 2, 3)$ 为 GAST 玻璃的塞米尔系数^[20]。

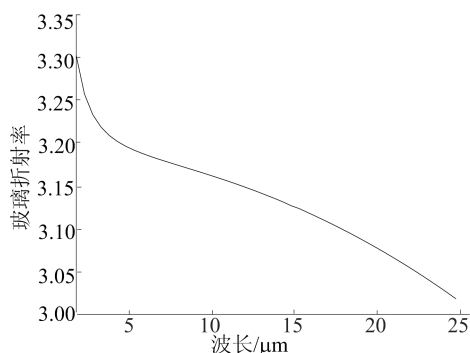
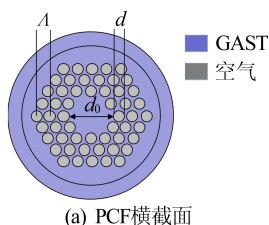


图 1 本文 PCF 截面和 GAST 玻璃折射率随波长变化的趋势

2 限制损耗影响因素分析

2.1 节距对基模限制损耗的影响

纤芯直径 d_0 是 PCF 最重要的结构参数, 首先研究纤芯直径对基模限制损耗的影响。 d_0 与节距 Λ (即相邻 2 个空气孔间距) 的大小关系密切, 当空气孔层数为 3 层、 $\rho = 0.75$ 时, 不同 Λ 对应的 d_0 见表 1 所列。

从表 1 可以看出, 当 Λ 从 $1.0 \mu\text{m}$ 增加到 $9.0 \mu\text{m}$ 时, PCF 整体尺寸变大, d_0 从 $2.7 \mu\text{m}$ 增加到 $24.3 \mu\text{m}$ 。

表 1 Λ 对应的纤芯直径 d_0

$\Lambda/\mu\text{m}$	$d_0/\mu\text{m}$
1.0	2.7
3.0	8.1
5.0	13.5
7.0	18.9
9.0	24.3

当 Λ 分别为 $1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 \mu\text{m}$ 时, 基模限制损耗随波长变化的趋势如图 2 所示, 可以看出, $2.0 \sim 25.0 \mu\text{m}$ 波段的限制损耗随着波长的增加而增加, 长波长处的限制损耗最高。

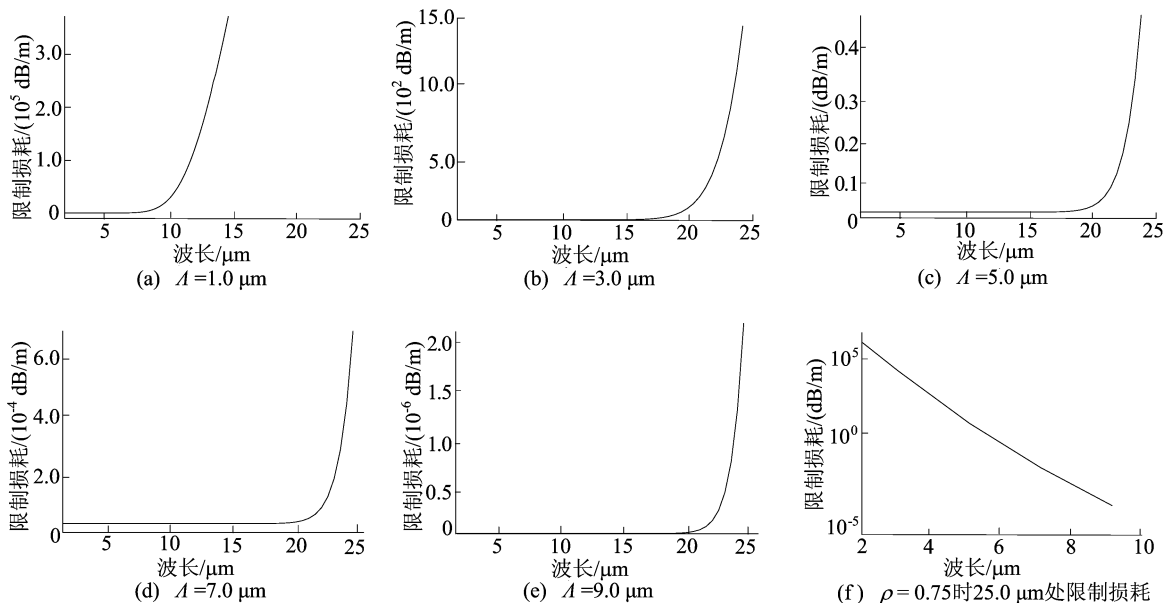


图 2 限制损耗随波长及 Λ 变化的趋势

图 2a 中, 当 $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$ 时, $6.6 \mu\text{m}$ 波长处的限制损耗约为 $1.05 \times 10^2 \text{ dB/m}$, $6.6 \mu\text{m}$ 之后限制损耗快速增加。这是由于此时 $d_0 = 2.7 \mu\text{m}$,

在波长小于 d_0 时 PCF 的纤芯对光波有较强的限制作用, 当扫描波长增加到接近 d_0 时, 光波开始从纤芯泄漏到包层中, 限制损耗开始变高; 当波长

增加到 d_0 以上时,更多的光以消逝波的形式被引导到包层中^[21],限制损耗变得很大,在 6.6 μm 波长后光波基本完全从纤芯泄露出去。

图 2b 中,当 $\Lambda=3.0 \mu\text{m}$ 时,25.0 μm 波长处的限制损耗约为 $1.2 \times 10^3 \text{ dB/m}$;图 2e 中,当 $\Lambda=9.0 \mu\text{m}$ 时,25.0 μm 波长处的限制损耗约为 $3.0 \times 10^{-6} \text{ dB/m}$ 。 d_0 的增加导致限制损耗迅速降低,当 d_0 增加 3 倍,限制损耗下降了几个数量级,在 d_0 较小时,限制损耗随波长变化的幅度较大。图 2f 所示为当 $\rho=0.75$ 时,25.0 μm 波长处 PCF 的限制损耗随 Λ 变化的趋势。随着 d_0 的增加,固定波长处的限制损耗迅速降低。由 Marcatili-Schmeltzer 传输模式理论^[22] 可知,光波在纤芯包层边界的掠射角随着纤芯直径的增加而增大,从而提高了近场衍射,因此可以通过增大纤芯直径来减少模式的传输损耗。

大纤芯 PCF 适用于高功率激光的传输和产生。而当 PCF 的 d_0 减小时,限制损耗增加,但可以增大纤芯截面上单位面积的光功率密度,使得光在 PCF 中传输时易产生各种非线性效应(如自相位调制和四波混频效应等),可作为超连续谱产生(supercontinuum generation, SCG)的理想介质,但较高的限制损耗不利于 15.0~25.0 μm 长波段光信号的传输。当 d_0 较大时,PCF 的非线性和限制损耗都变低,较低的限制损耗有利于产生光信号的传输,但较低的非线性系数不利于产生各种非线性效应。因此可以根据需要来选择适当的参数,设计所需纤芯直径的大小。

2.2 占空比对基模限制损耗的影响

除纤芯直径 d_0 外,PCF 的空气孔直径 d 对限制损耗的影响也很大。 Λ 固定不变时, d 随着 ρ 的增加而增加。当 $\Lambda=3.0 \mu\text{m}$, ρ 分别取 0.30、0.45、0.60、0.75、0.90 时基模限制损耗随波长变化的趋势如图 3a 所示,可以看出,限制损耗随着波长的增加而增加,25.0 μm 波长处限制损耗最高。当 $\Lambda=3.0 \mu\text{m}$, ρ 从 0.30 提高到 0.90 时,在 25.0 μm 波长处的限制损耗从 $6.0 \times 10^4 \text{ dB/m}$ 降低至 $4.8 \times 10^2 \text{ dB/m}$,限制损耗降低了几个数量级。这是因为纤芯由包层中的空气孔所环绕,空气孔将光波束缚在纤芯中传输,所以随着 d 的增加限制损耗逐渐降低。但此时的限制损耗还是较高,这是因为 d_0 较小,当光波开始泄露到包层中时, d 越大,对光波的束缚能力越强,越容易将激光光场束缚在高折射率的纤芯区域,阻挡能量的泄露。

当 Λ 分别为 3.0、5.0、7.0 μm 时,PCF 在 25.0 μm 波长处的限制损耗随 ρ 变化的趋势如图 3b 所示,可以看出,限制损耗随着 ρ 的增加逐渐降低。空气孔对限制损耗的影响与纤芯有很强的依赖性,纤芯直径越大,随着 ρ 的增加,PCF 基模的限制损耗降低得越快。当 $\Lambda=7.0 \mu\text{m}$ 时, ρ 每提高 0.10,PCF 的限制损耗降低 2 个数量级,较大的空气孔能更好地限制光波的泄露。

因此,为了获得低限制损耗的 PCF,占空比 ρ 选定为 0.90。

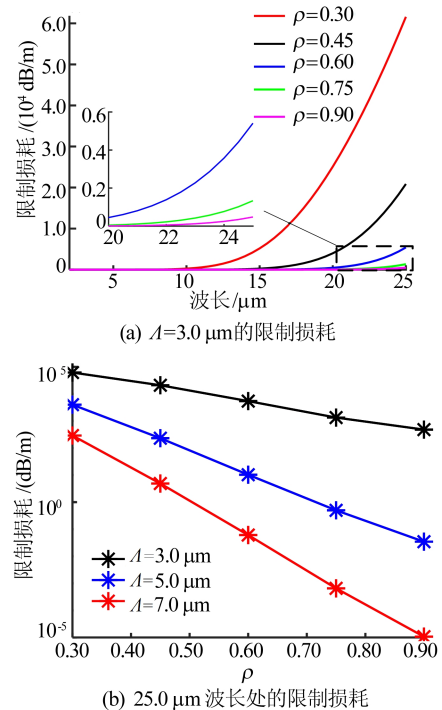


图 3 限制损耗随波长及 ρ 变化的趋势

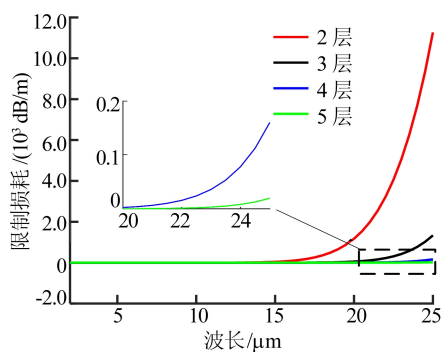
2.3 空气孔层数对基模限制损耗的影响

除了纤芯和空气孔直径,空气孔层数(即空气孔的数量)对限制损耗影响也很大。当空气孔层数分别为 2、3、4、5 时,基模限制损耗随波长变化的趋势如图 4a 所示,可以看出,限制损耗随着波长的增加而增加,25.0 μm 波长处限制损耗最高。当 $\Lambda=3.0 \mu\text{m}$, $\rho=0.75$ 时,随着空气孔层数从 2 增加到 5,在 25.0 μm 波长处限制损耗从 $1.12 \times 10^4 \text{ dB/m}$ 降低到 $1.95 \times 10^2 \text{ dB/m}$,限制损耗降低了几个数量级。

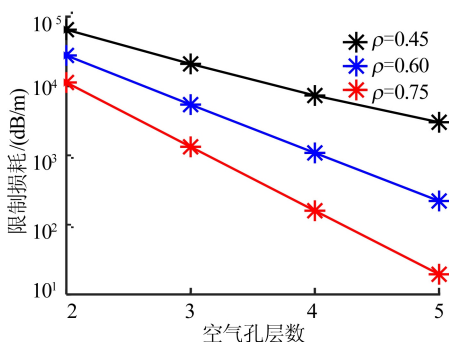
当 ρ 分别为 0.45、0.60、0.70 时,PCF 在 25.0 μm 波长处的限制损耗随空气孔层数变化的趋势如图 4b 所示,可以看出,限制损耗随着空气孔层数的增加逐渐降低。空气孔的层数对限制损耗的影响对于直径 d 有较强的依赖性, ρ 越大时,

随着空气孔层数的增加,限制损耗降低得越快。这是由于光波被限制在纤芯中传播,空气孔的直径越大,层数越多,对光波的限制能力越强。

理论上 PCF 存在限制损耗的原因是空气孔层数有限,因此通过提高空气孔层数可以显著降低 PCF 的限制损耗。考虑到光纤拉制与限制损耗的因素,取空气孔层数为 4。但是随着 PCF 拉制工艺的不断改进,PCF 包层可以设计尽可能多的空气孔层数来降低限制损耗。



(a) $\Lambda=3.0 \mu\text{m}$ 、 $\rho=0.75$ 时的限制损耗



(b) $25.0 \mu\text{m}$ 波长处的限制损耗

图 4 限制损耗随波长及空气孔层数的变化趋势

3 优化后的 PCF 及限制损耗特性

根据节距、占空比 ρ 和空气孔层数对限制损耗的影响,综合考虑确定 PCF 的结构参数。优化后的 PCF 结构参数见表 2 所列。

表 2 优化后的 PCF 结构参数

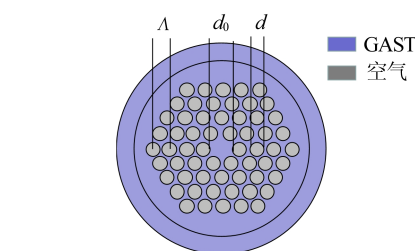
结构参数	数值
$\Lambda/\mu\text{m}$	8.0
$d_0/\mu\text{m}$	8.0
$d/\mu\text{m}$	7.2
空气孔层数	4

优化后的 PCF 结构如图 5a 所示。该 PCF 结构在 $2.0\sim 25.0 \mu\text{m}$ 波段的限制损耗随波长变

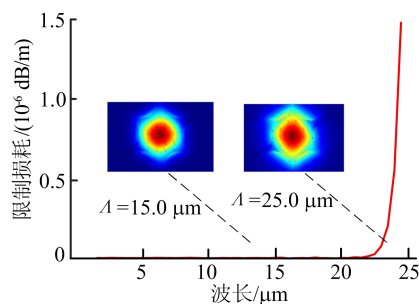
化的趋势以及在 15.0 、 $25.0 \mu\text{m}$ 波长处基模的模场分布如图 5b 所示。

从图 5b 可以看出,限制损耗随着波长的增加而增加, $25.0 \mu\text{m}$ 波长处限制损耗最高,但是 $2.0\sim 25.0 \mu\text{m}$ 波段的限制损耗整体低于 $1.4 \times 10^{-6} \text{ dB/m}$ 。这是由于在 d_0 较大时,较高的 d 对光场的限制有着很大提升,阻碍了能量从纤芯逃逸到包层。在高占空比 $\rho=0.90$ 的情况下,限制损耗对空气孔层数存在很强的依赖关系,因此选择空气孔层数为 4。

综上所述,优化后的 PCF 在 $2.0\sim 25.0 \mu\text{m}$ 波段低限制损耗传输是可行的。



(a) 优化后的 PCF 的横截面



(b) 限制损耗随波长的变化模场分布

图 5 优化后的 PCF 横截面及其限制损耗随波长的变化趋势

4 结 论

通过研究纤芯直径、空气孔直径和空气孔层数等因素对 PCF 在 $2.0\sim 25.0 \mu\text{m}$ 波段限制损耗的影响,本文设计了一种低限制损耗的 PCF,证明了 $2.0\sim 25.0 \mu\text{m}$ 波段低限制损耗传输的可行性。结果表明,影响限制损耗的最大因素是纤芯直径,限制损耗随着纤芯直径和空气孔直径的增大而显著降低,随着空气孔层数的增加而降低。该结论为 PCF 的设计提供了理论指导。当纤芯直径和节距为 $8.0 \mu\text{m}$ 、空气孔直径为 $7.2 \mu\text{m}$ 、包层空气孔层数为 4 时, $2.0\sim 25.0 \mu\text{m}$ 波段的限制损耗低于 $1.4 \times 10^{-6} \text{ dB/m}$ 。故本文所设计的低限制损耗 PCF 对 $2.0\sim 25.0 \mu\text{m}$ 全波段光信号的远距离传输具有重要意义。

[参 考 文 献]

- [1] TAO G, EBENDORFF-HEIDEPRIEM H, STOLYAROV A M, et al. Infrared fibers[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 379-458.
- [2] TAO G, SHABAHANG S, HE R, et al. Multimaterial rod-in-tube coextrusion for robust mid-infrared chalcogenide fibers[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2014, 5(12): 8982-8983.
- [3] PETERSEN C R, PRTLJAGA N, FARRIES M, et al. Mid-infrared multispectral tissue imaging using a chalcogenide fiber supercontinuum source [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 999-1002.
- [4] VENTURA A, BEN SLIMEN F, LOUSTEAU J, et al. Flexible mid-infrared fiber bundle for thermal imaging of inaccessible areas [J]. *Optics Express*, 2019, 27 (15): 20259-20272.
- [5] PI M, ZHENG C, BI R, et al. Design of a mid-infrared suspended chalcogenide/silica-on-silicon slot-waveguide spectroscopic gas sensor with enhanced light-gas interaction effect [J]. *Sensors and Actuators B (Chemical)*, 2019, 297: 126732.
- [6] KITAMURA R, PILON L, JONASZ M. Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature[J]. *Applied Optics*, 2007, 46 (33): 8118-8133.
- [7] LIAO M, GAO W, DUAN Z, et al. Directly draw highly nonlinear tellurite microstructured fiber with diameter varying sharply in a short fiber length[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1141-1150.
- [8] QIN G, XIN Y, KITO C, et al. Ultra-broadband supercontinuum generation from ultraviolet to 6.28 μm in a fluoride fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(16): 584-586.
- [9] LOUIS-RAFAËL R, FORTIN V, GAUTHIER J C, et al. Compact 3-8 μm supercontinuum generation in a low-loss As_2Se_3 step-index fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41 (20): 4605-4608.
- [10] SCHLISSER A, PICQUÉ N, HÄNSCH T W. Mid-infrared frequency combs[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6 (7): 440-449.
- [11] WANG X S, NIE Q H, WANG G X, et al. Investigations of Ge-Te-AgI chalcogenide glass for far-infrared application [J]. *Spectrochim Acta Part A (Molecular and Biomolecular Spectroscopy)*, 2012, 86: 586-589.
- [12] 刘永兴, 张培晴. $\text{Ge}_{30}\text{Sb}_8\text{Se}_{62}$ 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[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 190-195.
- [13] 张亚妮. 低损耗低非线性高负色散光子晶体光纤的优化设计[J]. *物理学报*, 2012, 61(8): 261-267.
- [14] 周铭皓, 黄勇林. 椭圆高双折射光子晶体光纤的双折射及损耗研究[J]. *光子学报*, 2016, 45(3): 92-96.
- [15] 薛璐, 张亚妮. 超低损耗低非线性平坦色散光子晶体光纤优化设计[J]. *光子学报*, 2018, 47(11): 36-44.
- [16] 廖昆, 廖健飞. 一种高双折射双零色散的缺陷型光子晶体光纤[J]. *量子电子学报*, 2019, 36(1): 123-128.
- [17] WHITE T P, MCPHEDRAN R C, DE STERKE C M, et al. Confinement losses in microstructured optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(21): 1660-1662.
- [18] 马玲芳, 刘敏. 渐变空气孔双芯光子晶体光纤特性研究 [J]. *量子光学学报*, 2011, 17(3): 225-230.
- [19] SAITOH K, KOSHIBA M. Confinement losses in air-guiding photonic bandgap fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 2(2): 236-238.
- [20] XIAO J, TIAN Y, ZHAO Z, et al. Investigation of tellurium-based chalcogenide double-clad fiber for coherent mid-infrared supercontinuum generation [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 55: 102144.
- [21] TONG L M, GATTASS R R, ASHCOM J B, et al. Sub-wavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, 426(6968): 816-819.
- [22] MARCATILI E A J, SCHMELTZER R A. Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1964, 43(4): 1783-1809.

(责任编辑 胡亚敏)