

光学学报

4 μm 单模单偏振硫系负曲率反谐振光纤

马欣欣¹, 李建设^{1*}, 郭海涛^{2**}, 李曙光¹, 许彦涛², 张豪², 孟潇剑¹, 郭英¹, 王蕊¹, 武彪¹, 赵原源¹, 崔兴旺¹

¹燕山大学理学院, 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北省微结构材料物理重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

²中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

摘要 提出并研究了一种以硫系玻璃为基底材料的红外负曲率反谐振光纤, 该光纤在 4 μm 附近可低损耗、单模单偏振传输光信号。利用有限元法对其性能进行数值仿真, 结果表明: 该光纤在 3.99~4.00 μm 波长范围内具有良好的单模单偏振特性, 特别是在 4 μm 波长处, 偏振消光比和高阶模式消光比分别达到 491 和 649, 表明其保偏性能具有很好的稳定性; 该光纤具有低损耗传输特性, 在 3.92~4.01 μm 波长范围内, x 偏振基模均可维持在平坦且损耗很低的反谐振区域内, 尤其在 4 μm 波长处, x 偏振基模的损耗仅为 1.8×10^{-4} dB/m; 该光纤具有良好的抗弯曲能力, 在单模单偏振传输下, 弯曲损耗始终小于 10^{-3} dB/m。该红外负曲率反谐振光纤不仅在中红外波段的通信和医疗领域具有良好的应用前景, 也为工作在 4 μm 波段的量子级联探测器提供了纯净光源。

关键词 光纤光学; 负曲率空芯光纤; 空芯反谐振光纤; 单模; 单偏振; 有限元法

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230573

1 引言

偏振效应在光纤通信^[1-2]、光纤传感器^[3-4]和光纤激光^[5]等偏振敏感系统中起着关键作用。一般来说, 由于在制备过程中会出现扭曲、缺陷、环境扰动等现象^[6-7], 所制造的光纤并不是完全均匀的, 这会引入随机双折射并导致光的偏振态发生不可预测的变化。为了解决上述问题, 通过改变光纤截面的对称结构和均匀应力分布, 引入高双折射保偏光纤(HBPMF)并将其应用于偏振模式系统中^[8-10]。然而, 当两束偏振光以不同的速度传播时, 高双折射保偏光纤会出现非常大的偏振色散^[11], 而单偏振光纤(SPF)只能传输一个偏振态的光^[12], 另一个方向的偏振光要么不能传输, 要么损耗较大。因此, 与高双折射保偏光纤相比, 单偏振光纤可以有效地避免由不同传输速度引起的偏振模式色散^[13]。

迄今为止, 国际上主要报道了两种类型的单偏振光纤, 一种是实芯单偏振光纤, 另一种是空芯单偏振光纤。与实芯光纤相比, 空芯光纤可以更好地将光限制在空气中传播, 使得光纤的色散和损耗保持在较低水平^[14-17]。因此, 对空芯光纤偏振性能的研究也受到越来越多的关注。根据光局域机制, 空芯光纤又被分为

两类, 一类是空芯光子带隙光纤(PBG-HCF)^[18-19], 另一类是 Benabid 等^[20]提出的 Kagome 光纤。与 PBG-HCF 相比, Kagome 光纤具有更宽的传输范围和更理想的传输频带^[21-22]。2010年, Wang 等^[23]证明了纤芯形状对传输的重要性, 实验结果表明, 拥有负曲率形状的 Kagome 光纤比传统光纤具有更低的损耗。至此, 负曲率空芯光纤开始登上历史舞台^[24-27]。与其他空芯光纤相比, 负曲率空芯光纤具有结构相对简单且便于制备、无限截止单模传输、限制损耗低等优点^[28-31], 这也使其成为滤波器等光学器件的潜在候选者。

研究表明, 3~5 μm 波段是衰减最小的大气窗口, 这个波段的光学器件在医疗、通信等领域发挥了重要作用^[32-34]。4 μm 波段是量子级联探测器探测低能级光的理想波段^[35], 单模单偏振光在这些波段发挥重要作用, 并为量子级联探测器提供更加纯净的光源。受到传统材料的光学性能和观察研究手段的限制, 在中红外波段开展的相关研究并不多。

硫系材料因具有声子能量低、红外透过波段宽、物理化学性质相对稳定等优点^[36], 成为制造中红外波段传输光纤的关键材料之一。然而, 硫系玻璃柔软, 且制备工艺相对复杂, 因此拉制具有均匀结构的硫系负曲率空芯光纤具有一定的挑战性^[37]。近年来, 制备技术

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-03-23; 录用日期: 2023-04-23; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2204001)、国家自然科学基金(12074331)、河北省自然科学基金(F2020203050)、中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室研究基金(SKLST201908)

通信作者: *jianshelee@ysu.edu.cn; **guoht_001@opt.ac.cn

已取得长足进步,可以通过“堆叠控制”^[38]或者挤压法等来制备光纤。Shiryayev 等^[39]报道了一种基于硫系材料的负曲率空芯反谐振光纤的设计和制备方法,所设计结构的内包层包含 8 根毛细管,理论仿真结果显示,该光纤的最低损耗小于 1 dB/km,但在实验测试中最低损耗为 3 dB/m(在 4.8 μm 波长处)。Gattass 等^[38]采用挤压法也制备了一种由 8 根毛细管嵌套的低损耗硫系负曲率空芯光纤,在 2~5 μm 波长范围内实现了损耗小于 1 dB/m 的传输。2023 年,Zhang 等^[40]采用堆叠控制法及双气路控制技术制备了包含 7 根内嵌管的负曲率空芯反谐振光纤,较好地保持了内嵌管的形貌,实验实现了在 4.79 μm 波长处 1.29 dB/m 的较低损耗。这些报道都表明,对于硫系反谐振光纤,实际制备的光纤在性能上都与理论仿真结果吻合得很好,这也说明了以硫系材料为基底的负曲率空芯光纤的设计可靠,性能稳定。受限于目前的光纤拉伸技术和炉内流体力学的复杂性,精确控制每根毛细管的尺寸和位置依然存在困难^[41]。不精确的结构以及不光滑的毛细管表面都是光纤损耗的重要来源,因此制备技术上的革新任重道远。

考虑到负曲率空芯光纤制备技术的现状和研究需求,本文提出一种以硫系玻璃为基底材料的负曲率反谐振光纤,该光纤采用制备技术相对成熟的 6 嵌套毛细管型排布。极简的光纤结构设计更加有利于降低潜在的实验制备难度和提供更可靠的性能保障。通过对结构参数的优化,在 4 μm 波长处实现了光纤的单模、

单偏振、低损耗和抗弯曲特性。仿真结果表明,在 3.99~4.00 μm 波段可以实现单模单偏振的效果,特别是当波长为 4 μm 时, x 偏振基模(FM)的损耗可以降低到 1.8×10^{-4} dB/m。此外,该光纤还表现出优异的抗弯曲性能,在不同的临界弯曲角度下, x 偏振基模的损耗均小于 10^{-3} dB/m。

2 光纤结构和仿真参数

光纤采用的基底材料为 $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ 组分硫系玻璃,其具有较低的本征损耗和良好的化学稳定性,以及良好的热稳定性和成纤性能。图 1(a)显示了光纤的截面结构,空白部分表示折射率为 1 的空气,其他区域为 $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ 组分硫系玻璃。光纤由内包层和外包层组成,外包层主要起到结构支撑的作用,内包层包括 6 根与外包层内壁相切的毛细管,通过调整毛细管大小、壁厚等参数可实现对光纤性能的调制。Mousavi 等^[42]的研究表明,在负曲率空芯光纤中引入不对称因子会产生高双折射效应,这使得简并模式很容易被分为两个偏振模式。因此,为了同时实现单模传输和单偏振传输,在内包层设计了两种具有不同尺寸和壁厚规格的毛细管,以破坏光纤结构的对称性。在图 1(a)中, r_1 和 t_1 分别表示 4 根小毛细管的半径和壁厚, r_2 和 t_2 分别表示 2 根大毛细管的半径和壁厚。设 D 为结构参数,表示 x 方向的纤芯直径。如图 1(a)所示,6 根毛细管的中心分别位于相邻夹角成 60° 的 3 条外包层圆的直径上。

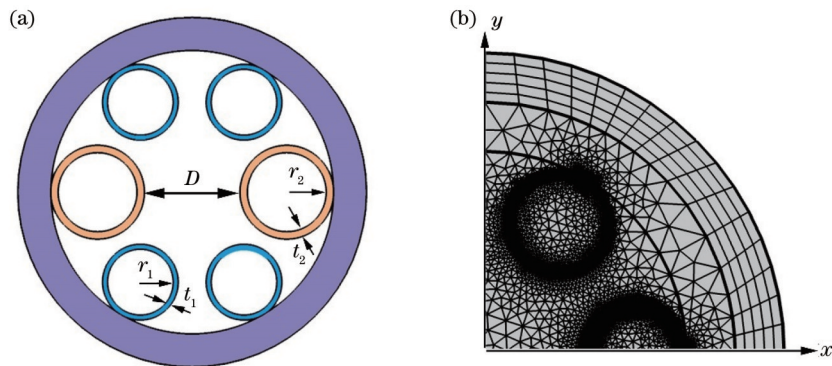


图 1 负曲率空芯光纤的横截面和有限元网格划分情况。(a) 光纤的横截面;(b) 1/4 光纤结构的有限元网格划分

Fig. 1 Cross section and finite element mesh structure of hollow core fiber with negative curvature. (a) Cross section of fiber; (b) finite element meshing of quarter fiber structure

采用全矢量有限元法对所提出的负曲率空芯光纤的性能进行数值仿真。在 COMSOL 软件中,光纤最外层被添加了完美匹配层,并且为了进一步降低反射光能量,同时将完美匹配层的边界条件设置为散射边界条件。光纤的整个结构被划分为 51264 个三角形网格区域。为了更加清楚地展示网格的划分情况,图 1(b) 等比例展示了光纤 1/4 结构的有限元划分效果。

利用红外可变角光谱偏偏仪(J. A. Woollam, IR

VASE Mark II) 测量了实际制备的 $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ 硫系玻璃在不同波长下的折射率分布情况,并对实验测量得到的离散数据进行拟合,得到

$$n = \sqrt{1 + \frac{a\lambda^2}{\lambda^2 - b^2} + \frac{c\lambda^2}{\lambda^2 - d^2}}, \quad (1)$$

式中 : $a=1.086124798769869$; $b=29.4410549515291 \mu\text{m}$; $c=4.75105962840813$; $d=0.1339057405590317 \mu\text{m}$; λ 为波长。 $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ 的实验数据与拟合曲线的对照关系如图 2 所示。在图 2 中,圆点

和虚线的组合为实验测量数值和实验数据趋势曲线,实线为该组分玻璃折射率随波长变化的色散关系,实线由式(1)得到。

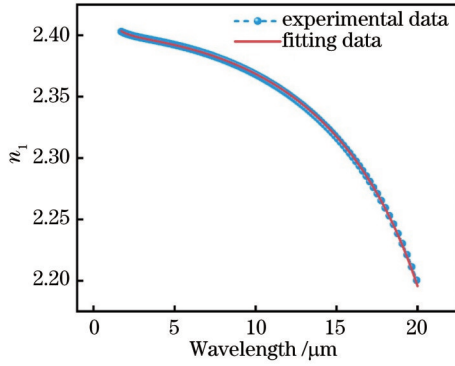


图 2 $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ 硫系玻璃的实测折射率及其随波长的变化关系
Fig. 2 Measured refractive indices and the fitted curve of $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ chalcogenide glass

Bureau 等^[43-45]证明了硫系玻璃材料比石英材料在红外波段具有更低的材料吸收损耗和更宽的光谱范围。选择 $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ 硫系玻璃作为基底材料,可以从根本上降低光纤的本征损耗,提升光纤在中红外波段的传输性能。同时,由于负曲率空芯光纤具有特殊的传输机制,光主要在纤芯的空气中传输,因此与材料相关的吸收损耗相对较小,在研究中可以忽略^[46]。宋镜明等^[47]的研究也表明,散射损耗是由材料内部折射率不均匀分布引起的,主要取决于光纤材料的缺陷和光纤的结构,通过改进技术可以显著降低散射损耗。基于以上分析,接下来主要通过以下限制损耗公式来研究光纤损耗随波长的变化关系^[48],即

$$l = \frac{8.686 \times 2\pi \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: l 为限制损耗; $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为有效折射率的虚部; n_{eff} 为有效折射率。

3 参数优化

控制变量法是设计光纤并优化结构参数的常用方法。首先,在已有的研究基础上结合设计经验给定一个初始的结构模型;其次,固定绝大多数参数,只选择一个参数作为变量来对光纤性能进行扫描输出,通过对结果的分析 and 判读来确定最优取值;最后,将该取值归入固定参数,选择另外一个未经修正的参数作为扫描参数进行新的扫描和最佳值确定。以此类推,就可以得到最终的光纤优化模型。通过该方法得到的其实是一个局部最优的结构。因为衡量光纤性能的指标有很多,评判依据并不唯一,好的结构设计追求的是在保证光纤性能整体平衡优化的前提下对某个特定指标的局部最优选择,所以只要优化后得到的结果满足研究需求即可。虽然目前已有一些结合 AI 技术或者遗传算法等来对光纤结构进行优化的报道,但这些方法仅

能做到对简单结构的参数优化,且优化结果也不一定就是最好的,因此控制变量法依然是较长时间内本领域的主流设计方法。下面将通过控制变量法改变毛细管壁厚、毛细管半径、纤芯直径等结构参数来分析研究光纤的传输损耗和抗弯曲等特性随结构参数和波长的变化关系。

3.1 毛细管壁厚对损耗的影响

对于负曲率反谐振光纤,毛细管壁厚是光纤损耗的重要影响参数之一。光纤反谐振的工作原理与法布里-珀罗(F-P)谐振腔非常相似^[49]。光纤中与纤芯壁未发生共振的光被反射回纤芯,然后在纤芯中以低损耗的方式传输;与纤芯壁发生共振的光则不受限制,因此会泄漏到包层区域^[50],并被严重衰减。在确定光纤材料后,毛细管壁厚是谐振波长的主要影响参数。当光在纤芯中产生共振现象时,毛细管的壁厚^[51]可以表示为

$$t_{\text{R}} = \frac{m\lambda}{2\sqrt{n_1^2 - n_0^2}}, \quad (3)$$

式中: t_{R} 为谐振时的壁厚; m 为整数; n_1 为毛细管壁材料($\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ 玻璃)的折射率; n_0 为空气的折射率,数值为 1。当光被限制在纤芯中时,毛细管的壁厚^[51]可以表示为

$$t_{\text{AR}} = \frac{(m - 0.5)\lambda}{2\sqrt{n_1^2 - n_0^2}}, \quad (4)$$

式中: t_{AR} 为反谐振时毛细管的壁厚。

为获得 $4 \mu\text{m}$ 波长处的纤芯传输特性,讨论了光纤壁厚对光纤结构的影响。在初始结构中,纤芯直径 D 和小毛细管半径 r_1 分别被设置为 $90 \mu\text{m}$ 和 $33 \mu\text{m}$,大毛细管的半径被设置为 $r_2 = 1.1r_1$,两种毛细管的壁厚保持 $t_2 = 1.1t_1$ 关系。图 3 展示了 x 偏振基模、 y 偏振基模和损耗最低的高阶模式(LP_{11} 模式)的限制损耗随壁厚 t_1 的变化关系,以及高阶模式消光比(HOMER; R_{HOMER})随壁厚 t_1 的变化关系。对于负曲率反谐振光纤,常用 HOMER 来描述其单模传输特性。HOMER 的值等于损耗最小的高阶模式(LP_{11} 模式)的限制损耗值与纤芯基模限制损耗值的比值^[52],即

$$R_{\text{HOMER}} = \frac{l_{\text{LP}_{11}}}{l_{\text{LP}_{01}}}, \quad (5)$$

式中: $l_{\text{LP}_{11}}$ 为 LP_{11} 模式的限制损耗; $l_{\text{LP}_{01}}$ 为纤芯基模的限制损耗。当 HOMER 的数值大于 100 时,认为光纤将保持单模传输^[52]。

从图 3 可以看出,当 $t_1 = 0.43 \mu\text{m}$ 时,基模在两个偏振方向上的限制损耗均最小,其中 x 偏振方向的基模损耗最低达 $9.2 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$ 。从图 3 还可以观察到 HOMER 对 t_1 具有很强的依赖性,其原理可以从式(3)~(5)中得到解释:由式(3)和式(4)可知,毛细管壁厚会对谐振波长和反谐振区域产生强相关影响,进而影响光纤在不同波长下各阶模式的限制损耗特性;

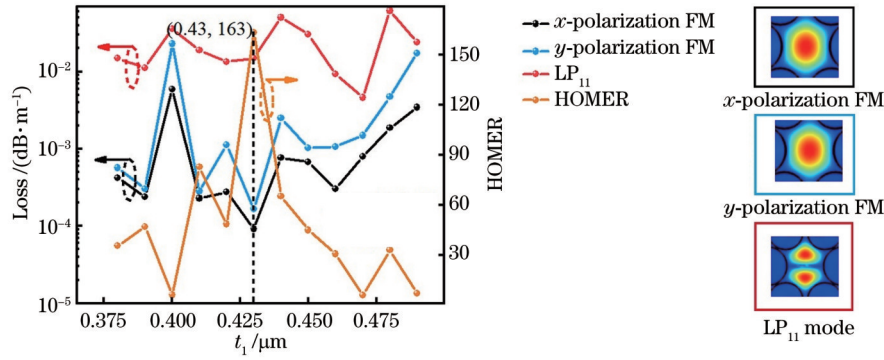


图 3 不同壁厚下, x 偏振基模、 y 偏振基模和 LP_{11} 模式的损耗以及 HOMER 的变化情况, 以及 $t_1=0.43 \mu\text{m}$ 、 $\lambda=4 \mu\text{m}$ 时 3 种模式的电场图

Fig. 3 Loss of x -polarization FM, y -polarization FM, and LP_{11} mode and the change of HOMER under different wall thicknesses, and electric field maps of the three modes at $t_1=0.43 \mu\text{m}$ and $\lambda=4 \mu\text{m}$

式(5)作为表征高阶模式与基模限制损耗对比度的参数, 自然也会体现 HOMER 大小与毛细管壁厚数值间的强关联性。因此, 可以通过 HOMER 随 t_1 的变化曲线来获取最优毛细管壁厚的取值。由图 3 可知, 当 $t_1=0.43 \mu\text{m}$ 时, HOMER 获得了最大值 163, 表明此时光纤具有最佳的高阶模抑制能力, 更容易获得单模特性。因此, 将 t_1 的值设置为 $0.43 \mu\text{m}$, 以获得光纤的单模低损耗结构。图 3 中右侧的 3 幅插图分别展示了在 t_1 为 $0.43 \mu\text{m}$ 、波长为 $4 \mu\text{m}$ 时所获得的 x 偏振基模、 y 偏振基模和 LP_{11} 模式的电场图。虽然 LP_{11} 模式的电场图只展示了一个位于纤芯区域的清晰轮廓, 但仿真结果表明, 当 $t_1=0.43 \mu\text{m}$ 时, HOMER 达到最大值, 实现了高阶模和基模的最佳区分, 能够保证光纤保持单模传输。

3.2 毛细管半径对损耗的影响

在 3.1 节参数优化的基础上, 对毛细管半径进行优化。由于毛细管半径的改变会引起纤芯直径的变化, 并对纤芯区域中包括基模和高阶模在内的所有偏振模式的限制损耗特性造成影响, 因此在单模单偏振

光纤的设计中, 对毛细管半径的优化也很重要。将初始的结构参数 D 和 t_1 分别设置为 90 、 $0.43 \mu\text{m}$, 优化过程中保持 $t_2 = 1.1t_1$ 和 $r_2 = 1.1r_1$ 的关系不变。优化时通过改变 r_1 来实现扫描。图 4 展示了模式损耗以及偏振消光比 (PER; R_{PER}) 和 HOMER 随毛细管半径 r_1 的变化关系。PER 被定义为 y 偏振基模损耗与 x 偏振基模损耗的比值^[52], 其计算公式为

$$R_{\text{PER}} = \frac{l_y}{l_x}, \quad (6)$$

式中: l_y 为 y 偏振基模损耗; l_x 为 x 偏振基模损耗。当 PER 大于 100 时, 认为光纤将维持单偏振传输状态^[52]。从图 4 可以观察到: y 偏振基模损耗和 LP_{11} 模式损耗均随着半径的改变出现较大幅度的波动, 且维持相对较高的损耗值; x 偏振基模则一直保持较低损耗的平稳传输。如图 4 所示, 当毛细管半径 $r_1=35.7 \mu\text{m}$ 时, PER 值达到 491, 此时只有 x 偏振基模可以在光纤纤芯中稳定传输, 同时 HOMER 值达到 649, 表明此时光纤实现了 x 偏振基模的单模传输。因此, 将毛细管半径 r_1 的最佳参数选取为 $35.7 \mu\text{m}$ 。

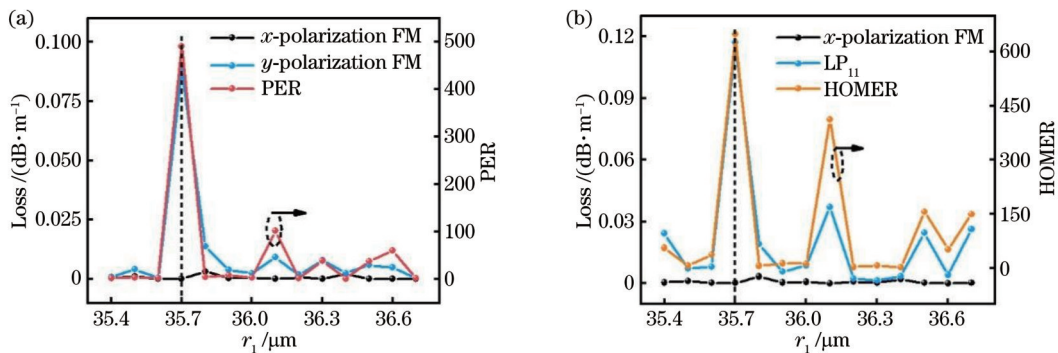


图 4 模式损耗以及 PER 和 HOMER 随毛细管半径 r_1 的变化关系。(a) x 偏振基模损耗、 y 偏振基模损耗以及 PER; (b) x 偏振基模损耗、 LP_{11} 模式损耗和 HOMER

Fig. 4 Variation in mode loss, PER, and HOMER with capillary radius r_1 . (a) x -polarization FM loss, y -polarization FM loss, and PER; (b) x -polarization FM loss, LP_{11} mode loss, and HOMER

3.3 纤芯直径对损耗的影响

通过改变纤芯直径可以改变光纤的有效模式面积,进而调节纤芯基模和高阶模式的损耗,在前两节优化的基础上,进一步分析纤芯直径对光纤性能的影响。光纤的初始结构参数设置如下:小毛细管的壁厚 t_1 和半径 r_1 分别被设置为 0.43 、 $35.7 \mu\text{m}$,两种毛细管的壁厚和半径依然保持 $t_2 = 1.1t_1$ 、 $r_2 = 1.1r_1$ 关系。图 5 给出了在 $4 \mu\text{m}$ 波长处 x 偏振基模损耗、PER 和 HOMER 随纤芯直径 D 的变化关系。可以明显看出:当纤芯直径为 $90 \mu\text{m}$ 时, x 偏振基模的损耗最小,有利于获得低损耗的偏振滤波器;PER 和 HOMER 均在纤芯直径为 $90 \mu\text{m}$ 时达到最大值。因此,设定 $D=90 \mu\text{m}$ 为最优纤芯直径。

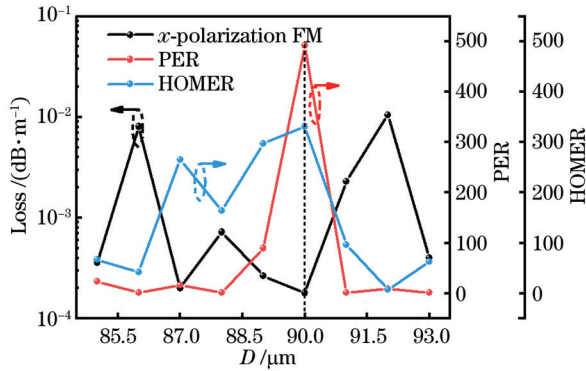


图 5 在 $4 \mu\text{m}$ 处不同纤芯直径下的 x 偏振基模损耗、HOMER 和 PER
Fig. 5 x -polarization FM loss, HOMER, and PER under different core diameters at $4 \mu\text{m}$

3.4 优化参数下的损耗

通过分析上述参数对偏振性能的影响,得到 $4 \mu\text{m}$ 波长附近实现偏振滤波的光纤结构的优化参数为 $t_1 = 0.43 \mu\text{m}$ 、 $t_2 = 1.1t_1$ 、 $r_1 = 35.7 \mu\text{m}$ 、 $r_2 = 1.1r_1$ 和 $D = 90 \mu\text{m}$ 。优化光纤结构参数后的 x 偏振基模损耗、PER 和 HOMER 如图 6 所示。在 $3.92 \sim 4.01 \mu\text{m}$ 波长范围内, x 偏振基模的损耗均很低,维持低损耗传输状态,尤其是在 $4 \mu\text{m}$ 波长处, x 偏振基模的损耗仅为 $1.8 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$;在 $3.92 \sim 4.01 \mu\text{m}$ 波长范围内, HOMER 几乎均大于 100,只有在 $3.98 \mu\text{m}$ 波长附近的很小范围内, HOMER 介于 69.69 到 100,表明在该波长范围内光纤高阶模损耗较高,不宜存在,光纤具有很好的单模特性;在 $3.99 \sim 4.00 \mu\text{m}$ 范围内, PER 值大于 100,光纤维持 x 偏振基模单偏振传输,特别是在 $4 \mu\text{m}$ 附近, PER 达到 491,远远大于 100,表明在该波长处光纤具有很好的单偏振传输稳定性。

4 弯曲性能

在实际应用中,光纤弯曲是不可避免的^[53],因此弯曲损耗是表征光纤抗弯曲能力的重要指标。光纤端面上微结构的存在会导致各向异性突出,而光纤弯曲会

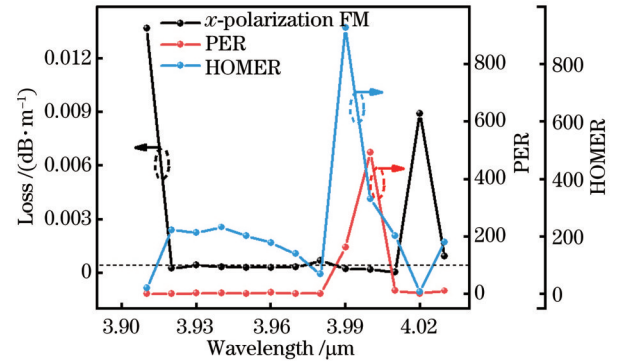


图 6 优化光纤结构参数后的 x 偏振基模损耗、HOMER 和 PER 随波长的变化
Fig. 6 x -polarization FM loss, HOMER, and PER change with wavelength after optimizing the fiber structure parameter

导致横截面折射率分布发生变化,弯曲后的折射率可以采用弯曲等效折射率模型进行分析,该模型已被 Martynkien 等^[54]证明与实际情况有很好的近似性。弯曲光纤的折射率分布^[55]可以表示为

$$n(x, y) = n_0(x, y) \left(1 + \frac{x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta}{R} \right), \quad (7)$$

式中: $n(x, y)$ 为弯曲后的等效折射率; $n_0(x, y)$ 为初始折射率; θ 为弯曲角度; R 为弯曲半径。光纤弯曲主要涉及弯曲方向和弯曲半径两个变量。其中:弯曲方向指光纤沿光纤截面弯曲时的方向,用式(7)中的弯曲角度 θ 表征,在下面的研究中将沿 x 偏振方向的角度设置为 0° ,弯曲方向与 x 偏振方向间的夹角设定为 θ ,则沿 y 偏振方向的弯曲角度为 90° ;弯曲半径是指在确定弯曲方向的基础上,光纤弯曲成圆形时的半径。弯曲损耗会随弯曲方向而变化。弯曲损耗所用的计算公式^[56]为

$$L_{\text{BL}} = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{Im} \left[n_{\text{eff}}(x, y) \right] \times 10^6, \quad (8)$$

式中: L_{BL} 为弯曲损耗; $\text{Im} \left[n_{\text{eff}}(x, y) \right]$ 为有效折射率的虚部; $n_{\text{eff}}(x, y)$ 为有效折射率。

为了评估光纤处于不同弯曲角度状态下保持单模单偏振传输的能力,引入临界弯曲半径这一参量,并将其定义为在某一弯曲方向上光纤能够保持单偏振单模传输时所需的最小弯曲半径^[52]。图 7(a) 给出了波长为 $4 \mu\text{m}$ 时光纤在不同弯曲角度下 x 偏振基模的临界弯曲半径和损耗的情况。研究表明,临界弯曲半径基本随着弯曲角度的增加而增大:当弯曲角度为 0° 时,临界弯曲半径为 14 cm ;当弯曲角度为 20° 时,最小临界弯曲半径为 13.2 cm ;当弯曲角度为 90° 时,最大临界弯曲半径为 31 cm 。同时,在不同弯曲角度的临界弯曲半径下, x 偏振基模均维持在低损耗传输状态,其损耗值均小于 10^{-3} dB/m 。图 7(b) 展示了图 7(a) 中不同弯曲角度及其对应临界弯曲半径下的 PER 和 HOMER 的变化情况。在考察的所有角度下, PER 和 HOMER 值

均大于 100, 表明当波长为 $4 \mu\text{m}$ 时, 在不同的弯曲角度下, 通过选择合适的弯曲半径, 均可以实现光纤的单模单偏振传输。特别是当弯曲角度为 40° 、临界弯曲半径为 21.4 cm 时, PER 和 HOMER 分别达到 801 和 3519, 可以极大地保障模式的稳定性。结合图 7(a) 和图 7(b) 可以发现, 光纤在 x 偏振方向始终可以保持低损耗传输, 但 PER 和 HOMER 有时会发生变

化, 这一现象的产生可能和 y 偏振基模以及 LP_{11} 模式的折射率变化情况有关。为了验证这一猜测, 对不同弯曲角度及其对应临界弯曲半径下的 x 偏振基模、 y 偏振基模以及 LP_{11} 模式的折射率进行仿真, 结果如图 7(c)、(d) 所示。可以看到, y 偏振基模以及 LP_{11} 模式的折射率的改变, 导致图 7(b) 中的 PER 和 HOMER 发生变化。

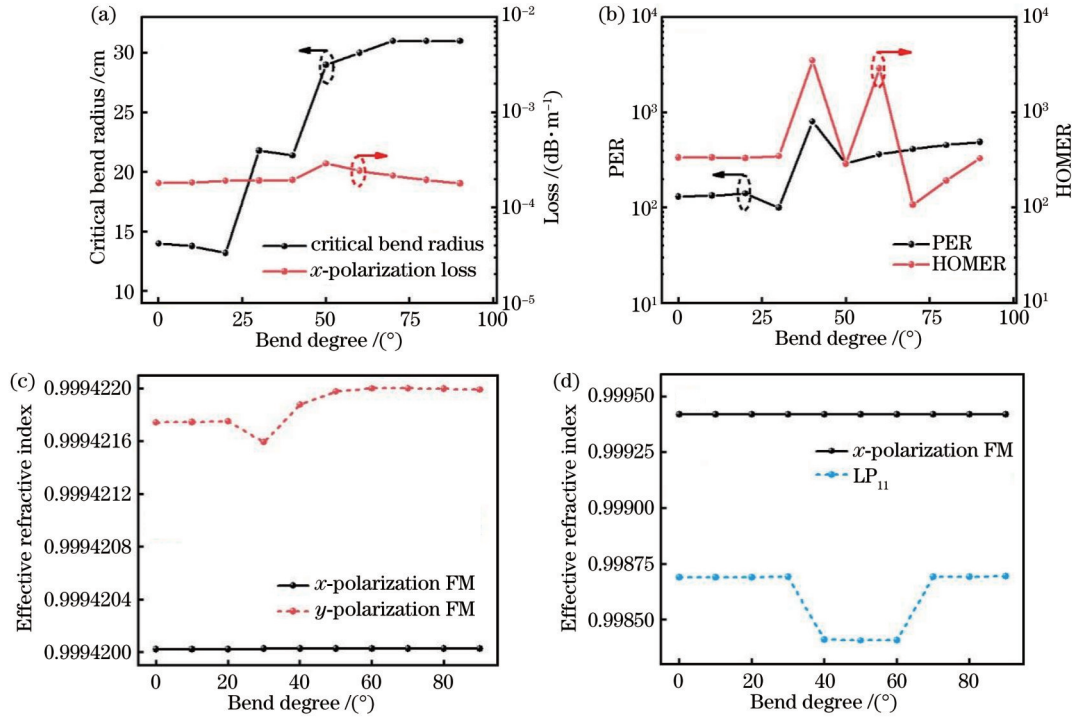


图 7 光纤模式的临界弯曲半径、损耗、PER、HOMER 以及折射率随弯曲角度的变化关系。(a) x 偏振基模在不同弯曲角度下的临界弯曲半径和在该弯曲半径下的损耗; (b) 光纤模式在不同弯曲半径下的 PER 和 HOMER; (c) 光纤基模在不同弯曲半径下的有效折射率; (d) 光纤模式在不同弯曲半径下的有效折射率

Fig. 7 Relationship between the critical bending radius, loss, PER, HOMER, and effective refractive index of fiber mode and bending angle. (a) Critical bending radius of x -polarization FM at different bending angles and the loss at corresponding bending radii; (b) PER and HOMER of fiber mode under different bending radii; (c) effective refractive index of fiber FM under different bending radii; (d) effective refractive index of fiber mode under different bending radii

有效模场面积可以用来衡量每个模式所占据的横截面积。在光纤中有效模场面积^[57]可表示为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint_S |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint_S |E|^4 dx dy}, \quad (9)$$

式中: E 为电场强度; S 为光纤横截面。图 8 给出了 x 偏振基模限制损耗和有效模场面积随弯曲半径 R 的变化关系, 但没有考虑单模单偏振这一条件, 仅考虑了在弯曲角度为 0° 时弯曲半径对模场的影响情况。从图 8 可以看出, 在不同弯曲半径下, 有效模场面积和损耗保持了较好的同步关系, 有效模场面积增大, 表明光纤对光的限制能力变弱, 光纤损耗增大。当弯曲半径处于 $1 \sim 10 \text{ cm}$ 的考察范围时, 有效模场面积维持在较小的变化范围, 限制损耗也处于较低水平, 最大限制损耗

仅为 $5.3 \times 10^{-3} \text{ dB/m}$, 表明该光纤具备很好的抗弯曲性能。

5 参数优化后光纤的归一化功率

归一化输出功率是衡量滤波器性能的重要参数, 归一化输出功率的计算公式^[58]为

$$P_{\text{out}}(x, y) = P_{\text{in}}(x, y) \exp \left[-l(x, y) \frac{\ln 10}{10} L \right], \quad (10)$$

式中: $P_{\text{in}}(x, y)$ 为输入功率, 取值为 1; l 为限制损耗; L 为光纤长度。当光纤长度 L 分别为 $1, 3, 5 \text{ mm}$ 时, 归一化输出功率随波长的变化如图 9 所示。随着传输长度的增加, 光纤输出功率在所有波长处均减小, 这是由光纤损耗造成的, 符合一般性规律。由于 x 偏振基模在 $3.91 \mu\text{m}$ 和 $4.02 \mu\text{m}$ 波长处具有较大的损耗, 因此归一化功率出现两个明显的波谷。在两个波谷之间的

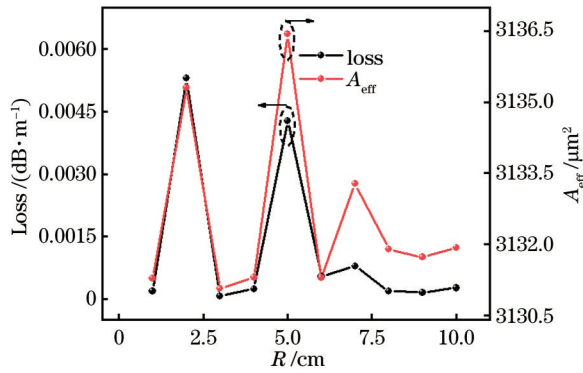


图 8 不同弯曲半径下 x 偏振基模的限制损耗和有效模场面积图像

Fig. 8 Loss and effective mode field area of x -polarization FM under different bending radii

3.92~4.01 μm 波长范围内, mm 量级光纤的 x 偏振基模均能保持低损耗传输。

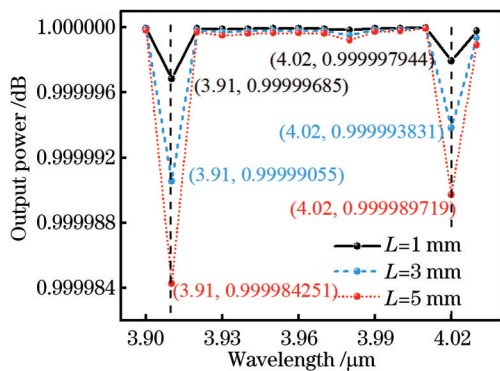


图 9 不同光纤长度下的归一化输出功率

Fig. 9 Normalized output power under different fiber length

6 结 论

提出一种单模单偏振、低损耗的负曲率反谐振光纤。光纤材料选用 $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ 硫系玻璃, 其在 4 μm 波长处折射率为 2.395, 在中红外波段具有较低的本征损耗和良好的化学稳定性, 有利于实现光纤的低损耗性能; 光纤结构采用目前制备技术相对成熟、结构简单的 6 嵌套毛细管型的负曲率空芯反谐振结构。优化光纤参数后, 在 3.99~4.00 μm 波长范围内可以实现单模单偏振的效果, 尤其是在 4 μm 波长处, PER 和 HOMER 分别达到了 491 和 694, 满足单偏振单模传输的条件, 且损耗低至 1.8×10^{-4} dB/m。光纤还具有良好的抗弯曲性能, 在 4 μm 波段的任意弯曲角度下, 通过选择合适的弯曲半径, 均可以实现光纤的单模单偏振传输。当弯曲角度为 0° 、弯曲半径在 1~10 cm 范围内时, 光纤限制损耗均小于 5.3×10^{-3} dB/m。所提出的负曲率空芯反谐振光纤具有结构简单、维持单模单偏振运转、损耗低和抗弯曲性能好等优点, 不仅可以应用于通信领域和医疗系统, 更有望为工作在 4 μm 波段的量子级

联探测器提供纯净光源。

参 考 文 献

- [1] Noda J, Okamoto K, Sasaki Y. Polarization-maintaining fibers and their applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(8): 1071-1089.
- [2] Wei C L, Menyuk C R, Hu J. Polarization-filtering and polarization-maintaining low-loss negative curvature fibers[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9528-9540.
- [3] Kumar S, Singh R, Kaushik B K, et al. LSPR-based cholesterol biosensor using hollow core fiber structure[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(17): 7399-7406.
- [4] Habib M S, Adamu A I, Markos C, et al. Enhanced birefringence in conventional and hybrid anti-resonant hollow-core fibers[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 12516-12530.
- [5] Chen S Q, Han L, Schülzgen A, et al. Local electric field enhancement and polarization effects in a surface-enhanced Raman scattering fiber sensor with chessboard nanostructure[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13016-13023.
- [6] Smith A M. Birefringence induced by bends and twists in single-mode optical fiber[J]. Applied Optics, 1980, 19(15): 2606-2611.
- [7] Imoto N, Yoshizawa N, Sakai J, et al. Birefringence in single-mode optical fiber due to elliptical core deformation and stress anisotropy[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(11): 1267-1271.
- [8] Nishizawa N, Seno Y, Sumimura K, et al. All-polarization-maintaining Er-doped ultrashort-pulse fiber laser using carbon nanotube saturable absorber[J]. Optics Express, 2008, 16(13): 9429-9435.
- [9] Pilarik M, Homola J, Maníková Z, et al. Surface plasmon resonance sensor based on a single-mode polarization-maintaining optical fiber[J]. Sensors and Actuators B, 2003, 90(1/2/3): 236-242.
- [10] Burns W K, Moeller R P, Villarruel C A, et al. Fiber-optic gyroscope with polarization-holding fiber[J]. Optics Letters, 1983, 8(10): 540-542.
- [11] Burns W K, Moeller R P. Measurement of polarization-mode dispersion in high-birefringence fiber[J]. Optics Letters, 1983, 8(3): 195-197.
- [12] 邹欢欢, 姚晓天, 于超, 等. 基于偏振串扰分析仪的 LiNbO_3 集成 Y 波导的测试方法[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0613001. Zou H H, Yao X T, Yu C, et al. Test method for LiNbO_3 integrated Y-waveguide based on polarization crosstalk analyzer [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0613001.
- [13] 赵畅, 李积鹏, 杨宏达, 等. 基于“耦合-耦合-吸收”机理的超宽带单模单偏振微结构光纤[J]. 光学学报, 2023, 43(2): 0206003. Zhao C, Li J P, Yang H D, et al. Ultra-broadband single-mode single-polarization micro-structured fiber based on "coupling-coupling-absorption" mechanism[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(2): 0206003.
- [14] Poletti F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 23807-23828.
- [15] Habib M S, Antonio-Lopez J E, Markos C, et al. Single-mode, low loss hollow-core anti-resonant fiber designs[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 3824-3836.
- [16] 林华, 张娴, 朱晓松, 等. 基于金属-介质-金属多层膜结构的空芯光纤折射率传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0606006. Lin H, Zhang X, Zhu X S, et al. Refractive index sensor based on hollow optical fiber with metal-dielectric-metal multilayered films structure[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0606006.
- [17] 刘营, 周桂耀, 夏长明, 等. 八边形空芯微结构光纤的制备和特性分析[J]. 应用激光, 2014, 34(4): 341-345. Liu Y, Zhou G Y, Xia C M, et al. The fabrication and properties analysis of octagonal hollow core micro-structured fiber[J]. Applied Laser, 2014, 34(4): 341-345.
- [18] Saitoh K, Florous N J, Murao T, et al. Design of photonic band

- gap fibers with suppressed higher-order modes: towards the development of effectively single mode large hollow-core fiber platforms[J]. *Optics Express*, 2006, 14(16): 7342-7352.
- [19] Fini J M. Aircore microstructure fibers with suppressed higher-order modes[J]. *Optics Express*, 2006, 14(23): 11354-11361.
- [20] Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, et al. Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Science*, 2002, 298(5592): 399-402.
- [21] Belardi W, Knight J C. Hollow antiresonant fibers with reduced attenuation[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1853-1856.
- [22] Yu F, Knight J C. Negative curvature hollow-core optical fiber [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 22(2): 146-155.
- [23] Wang Y Y, Couny F, Roberts P J, et al. Low loss broadband transmission in optimized core-shape Kagome Hollow-Core PCF [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2010, May 16-21, 2010, San Jose, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2010: CPDB4.
- [24] Hasan M I, Akhmediev N, Chang W. Positive and negative curvatures nested in an antiresonant hollow-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 703-706.
- [25] Gao S F, Wang Y Y, Ding W, et al. Hollow-core conjoined-tube negative-curvature fibre with ultralow loss[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2828.
- [26] Zhang X, Gao S F, Wang Y Y, et al. Design of large mode area all-solid anti-resonant fiber for high-power lasers[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9(2): e23.
- [27] 斯贝贝, 刘家祥, 司赶上, 等. 基于反谐振空芯光纤的甲烷气体检测[J]. *光学学报*, 2022, 42(19): 1906003.
Si B B, Liu J X, Si G S, et al. Methane gas detection based on anti-resonant hollow fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1906003.
- [28] Yan S B, Lian Z G, Lou S Q, et al. Single-polarization single-mode hollow-core negative-curvature fiber with silicon-coated cladding[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(5): 269.
- [29] Yan S B, Lian Z G, Lou S Q, et al. A new method to achieve single-polarization guidance in hollow-core negative-curvature fibers[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 53419-53426.
- [30] Debord B, Amrani F, Vincetti L, et al. Hollow-core fiber technology: the rising of "gas photonics"[J]. *Fibers*, 2019, 7(2): 16.
- [31] Debord B, Amsanpally A, Chafer M, et al. Ultralow transmission loss in inhibited-coupling guiding hollow fibers[J]. *Optica*, 2017, 4(2): 209-217.
- [32] Adamu A I, Habib M S, Petersen C R, et al. Deep-UV to mid-IR supercontinuum generation driven by mid-IR ultrashort pulses in a gas-filled hollow-core fiber[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 4446.
- [33] Maes F, Fortin V, Bernier M, et al. 5.6 W monolithic fiber laser at 3.55 μm [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2054-2057.
- [34] Wang Y Z, Feng Y Y, Adamu A I, et al. Mid-infrared photoacoustic gas monitoring driven by a gas-filled hollow-core fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 3512.
- [35] Giorgetta F R, Baumann E, Theron R, et al. Short wavelength (4 μm) quantum cascade detector based on strain compensated InGaAs/InAlAs[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(12): 121101.
- [36] Nguyen V Q, Sanghera J S, Pureza P, et al. Fabrication of arsenic selenide optical fiber with low hydrogen impurities[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2002, 85(11): 2849-2851.
- [37] Weiblen R J, Menyuk C R, Gattass R R, et al. Fabrication tolerances in As_2S_3 negative-curvature antiresonant fibers[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2624-2627.
- [38] Gattass R R, Rhonehouse D, Gibson D, et al. Infrared glass-based negative-curvature anti-resonant fibers fabricated through extrusion[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25697-25703.
- [39] Shiryayev V S, Kosolapov A F, Pryamikov A D, et al. Development of technique for preparation of As_2S_3 glass preforms for hollow core microstructured optical fibers[J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2014, 16(9): 1020-1025.
- [40] Zhang H, Chang Y J, Xu Y T, et al. Design and fabrication of a chalcogenide hollow-core anti-resonant fiber for mid-infrared applications[J]. *Optics Express*, 2023, 31(5): 7659-7670.
- [41] Jason G T, Shrimpton J S, Chen Y, et al. MicroStructure Element Method (MSEM): viscous flow model for the virtual draw of microstructured optical fibers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 312-329.
- [42] Mousavi S A, Sandoghchi S R, Richardson D J, et al. Broadband high birefringence and polarizing hollow core antiresonant fibers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22943-22958.
- [43] Bureau B, Boussard C, Cui S, et al. Chalcogenide optical fibers for mid-infrared sensing[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(2): 027101.
- [44] Feng X, Ren H, Xu F, et al. Few-moded ultralarge mode area chalcogenide photonic crystal fiber for mid-infrared high power applications[J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16658-16672.
- [45] Li G T, Peng X F, Dai S X, et al. Highly coherent 1.5-8.3 μm broadband supercontinuum generation in tapered As-S chalcogenide fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(9): 1847-1852.
- [46] 刘小璐, 田翠萍, 汪滢莹. 空芯光子晶体光纤的纤芯设计及特性研究[J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(12): 1861-1866.
Liu X L, Tian C P, Wang Y Y. Fiber core design and property research of hollow-core photonic crystal fibers[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 41(12): 1861-1866.
- [47] 宋镜明, 孙康, 徐小斌. 空芯光子带隙光纤散射损耗特性及结构优化研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1105003.
Song J M, Sun K, Xu X B. Scattering loss analysis and structure optimization of hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1105003.
- [48] Wang Y J, Li S G, Li J S, et al. Novel external gold-coated side-leakage photonic crystal fiber for tunable broadband polarization filter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(6): 1791-1799.
- [49] Hu J, Menyuk C R. Understanding leaky modes: slab waveguide revisited[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 58-106.
- [50] 高寿飞, 汪滢莹, 王璞. 反谐振空芯光纤及气体拉曼激光技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508014.
Gao S F, Wang Y Y, Wang P. Research progress on hollow-core anti-resonant fiber and gas Raman laser technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508014.
- [51] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, et al. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [52] Yan S B, Lou S Q, Zhang W, et al. Single-polarization single-mode double-ring hollow-core anti-resonant fiber[J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31160-31171.
- [53] 鲁文举, 张鑫, 朱宽, 等. 无节点反谐振空芯光纤 1064 nm 高功率皮秒脉冲传输[J]. *中国激光*, 2022, 49(3): 0306001.
Lu W J, Zhang X, Zhu K, et al. Propagation of high-power picosecond pulse at 1064 nm using nodeless anti-resonant hollow-core fibre[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(3): 0306001.
- [54] Martynkien T, Olszewski J, Szpulak M, et al. Investigations of bending loss oscillations in large mode area photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2007, 15(21): 13547-13556.
- [55] Wang X, Lou S Q, Lu W L. Bend-resistant large-mode-area photonic crystal fiber with a triangular-core[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(18): 4323-4328.
- [56] Xie Y H, Pei L, Zheng J J, et al. Low-DMD and low-crosstalk few-mode multi-core fiber with air-trench/holes assisted graded-

- index profile[J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126155.
- [57] Liu S D, Zhang L, Tian M, et al. Epsilon negative-based, broadband single-polarization single-mode hollow core anti-resonant photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15664-15677.
- [58] Yu Y L, Kishikawa H, Liaw S K, et al. Broadband silicon core photonic crystal fiber polarization filter based on surface plasmon resonance effect[J]. *Optics Communications*, 2021, 482: 126587.

Single-Mode Single-Polarization Chalcogenide Negative-Curvature Hollow-Core Fibers at 4 μm

Ma Xinxin¹, Li Jianshe^{1*}, Guo Haitao^{2**}, Li Shuguang¹, Xu Yantao², Zhang Hao²,
Meng Xiaojian¹, Guo Ying¹, Wang Chun¹, Wu Biao¹, Zhao Yuanyuan¹, Cui Xingwang¹

¹State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Key Laboratory for Microstructural Material Physics of Hebei Province, School of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;

²State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China

Abstract

Objective As one of the important properties of the light field, polarization plays an important role in the interaction between light and matter. The modulation of polarization plays an indispensable role in optical communication systems, fiber sensors, fiber lasers, and other fields. However, in view of the twist, defects, environment perturbations, and other factors in the process of optical fiber manufacturing, the manufactured optical fiber is not completely uniform, which introduces random birefringence and leads to unpredictable polarization states. Therefore, it is of great practical value to study optical fibers with excellent polarization states. Although the existing single-polarization single-mode negative-curvature hollow-core fiber has the advantages of simple structure, easy preparation, endless single-mode transmission, and low loss, due to the limitation of research habits and optical materials, the current research mainly focuses on common communication bands. But obviously, the mid-infrared band will become the next hot band of the negative-curvature hollow-core fiber. Research shows that a wavelength of 3–5 μm plays an important role in national defense, medical care, communications, and other fields, especially near the wavelength of 4 μm , which is an ideal band for quantum cascade detectors to detect low-level light. Single-mode single-polarization light helps to provide a more pure light source for quantum cascade detectors. Therefore, it is of great practical significance to study the single-mode single-polarization negative-curvature hollow-core fiber with a wavelength of 4 μm .

Methods A hollow-core anti-resonant fiber composed of six nested tubes working near 4 μm is designed, which can transmit single-mode single-polarization with low loss. The influence of structural parameters on fiber performance is calculated by using the control variable method. The capillary wall thickness will lead to an obvious change in the fiber loss with the working band, which is the key factor affecting the characteristics of the negative-curvature hollow-core anti-resonant fiber. Therefore, the capillary wall thickness is analyzed and optimized. Through the scanning study of the capillary wall thickness, the local optimal parameter values of the minimum fundamental mode loss and the maximum high-order mode extinction ratio in the 4 μm band are determined, and the design goal of the single-mode performance of the fiber is successfully realized. The second step is to optimize the capillary radius. This parameter mainly affects the polarization state of the fiber, and different parameter combinations of the six inner tube radii correspond to different implementation effects. The optimization of capillary radius successfully achieves single-polarization operation in a single-mode state. In the third step, the core diameter of the fiber is optimized. Although the study does not reflect the further optimization effect of the parameters that have been optimized and determined in the previous steps, the parameter design still retains the effective mode area and the maximum transmission power tolerance value of the fiber. The fourth step is to study and characterize the bending resistance of optical fiber. Research shows that this design fully meets the preset requirements for bending resistance and verifies that the natural advantages of negative-curvature hollow-core anti-resonant fibers, such as large effective mode field area and less substrate material coverage, can contribute to the bending resistance of the fiber.

Results and Discussions A negative-curvature hollow-core fiber with low-loss single-mode single-polarization

transmission is proposed and analyzed by the finite element method. By calculating the influence of fiber parameters on the fiber structure, the high-order mode extinction ratio reaches 163 (Fig. 3), and the fiber successfully realizes single-mode transmission. However, in order to further ensure the single polarization performance of the fiber, the size of the capillary radius is optimized, and the single polarization function is realized based on single-mode transmission (Fig. 4). In order to ensure that the fiber has good bending resistance, the critical bending radius of the fiber is defined, and it is found that the bending loss of the x -polarization fundamental mode of the fiber is always less than 10^{-3} dB/m (Fig. 7). In addition, the fiber structure also has a large effective mode field area (Fig. 8), which meets the transmission requirements of high power lasers. The results show that the designed structure achieves both single-polarization performance and single-mode transmission.

Conclusions In this paper, a single-mode, single-polarization, low-loss, negative-curvature, hollow-core, and anti-resonant fiber is proposed. The substrate material of the fiber is $As_{40}S_{60}$, which is specially studied and experimentally prepared by Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Its refractive index is 2.395 at $4\ \mu\text{m}$. It has low intrinsic loss and great chemical stability in the mid-infrared band, which is beneficial to realize the low loss performance of the fiber. The fiber structure adopts a six-nested, capillary-type, negative-curvature, hollow-core, and anti-resonant structure with relatively mature preparation technologies and a simple structure. After optimizing the parameters of the fiber, the single-mode single-polarization effect can be achieved from $3.99\ \mu\text{m}$ to $4.00\ \mu\text{m}$. Especially at the wavelength of $4\ \mu\text{m}$, the polarization extinction ratio (PER) and high order mode extinction ratio (HOMER) reach 491 and 694, respectively, which meet the conditions of single-polarization single-mode transmission, and the loss is as low as 1.8×10^{-4} dB/m. The fiber also has excellent bending resistance. At the wavelength of $4\ \mu\text{m}$, single-mode single-polarization transmission of the fiber can be achieved by selecting the appropriate bending radius at any bending angle. When the bending angle is equal to 0° , and the bending radius is from 1 cm to 10 cm, the confinement loss of the fiber is less than 5.3×10^{-3} dB/m. The negative-curvature, hollow-core, and anti-resonant fiber proposed in this paper has the advantages of simple structure, single-mode single-polarization operation, low loss, and excellent bending resistance. It can not only be applied to the communication industry and medical system but also is expected to provide a more pure light source for quantum cascade detectors operating in the band of $4\ \mu\text{m}$.

Key words fiber optics; negative-curvature hollow-core fiber; hollow-core anti-resonant fiber; single-mode; single-polarization; finite element method