

窄带空芯反谐振光纤的制备及其模式转换应用研究

杨家豪 张傲岩 夏长明 邓志鹏 刘建涛 黄卓元 康嘉健 曾浩然 蒋仁杰 莫志峰 侯峙云 周桂耀

Preparation and mode conversion application of narrowband hollow-core anti-resonant fiber

Yang Jia-Hao Zhang Ao-Yan Xia Chang-Ming Deng Zhi-Peng Liu Jian-Tao Huang Zhuo-Yuan
Kang Jia-Jian Zeng Hao-Ran Jiang Ren-Jie Mo Zhi-Feng Hou Zhi-Yun Zhou Gui-Yao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 134207 (2022) DOI: 10.7498/aps.70.20212194

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212194>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高性能反谐振空芯光纤导光机理与实验制作研究进展

Theoretical and experimental investigation of light guidance in hollow-core anti-resonant fiber

物理学报. 2018, 67(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180724>

太赫兹双芯反谐振光纤的设计及其耦合特性

Design and coupling characteristics of terahertz dual-core anti-resonant fiber

物理学报. 2020, 69(20): 208703 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200662>

二氧化钒相变对太赫兹反谐振光纤谐振特性的影响及其应用

Effect of phase transition of vanadium dioxide on resonance characteristics of terahertz anti-resonant fiber and its applications

物理学报. 2021, 70(16): 168701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210084>

基于表面等离子体共振的新型超宽带微结构光纤传感器研究

A new type of ultra-broadband microstructured fiber sensor based on surface plasmon resonance

物理学报. 2021, 70(7): 074207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201477>

200 km沙漠链路高精度光纤时频传递关键技术研究

Key technology of high-precision time frequency transfer via 200 km desert urban fiber link

物理学报. 2019, 68(6): 060602 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182000>

基于空芯微结构光纤拉曼探针的实验研究

Raman probe based on hollow-core microstructured fiber

物理学报. 2018, 67(18): 184211 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180684>

窄带空芯反谐振光纤的制备及其模式转换应用研究*

杨家濠 张傲岩 夏长明[†] 邓志鹏 刘建涛 黄卓元 康嘉健
曾浩然 蒋仁杰 莫志峰 侯峙云 周桂耀

(华南师范大学信息光电子科技学院, 广州 510006)

(2021 年 11 月 28 日收到; 2022 年 3 月 17 日收到修改稿)

空芯反谐振光纤由于其优异的光学特性, 如低非线性、超低群速度色散、低温度敏感性和高损伤阈值等, 使其在大功率激光传输、量子通信、传感、航空航天等多个领域有着潜在的应用, 成为未来最具发展潜力的特种光纤. 由于空芯反谐振光纤能够将 99.9% 以上光场限制在光纤的空芯区域中, 这也使其成为光纤滤波器、模式转换等领域的重要光子器件. 本文针对 980 nm 单模激光器的迫切需求, 研制了一种应用于 980 nm 多模激光转 980 nm 单模激光的空芯反谐振光纤, 并对其应用进行了实验验证.

关键词: 光纤光学, 反谐振, 导光特性, 模式转换

PACS: 42.81.-i, 42.70.-a, 42.81.Gs, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.70.20212194

1 引言

980 nm 激光器是目前市场及科研研究领域应用的最多的激光器, 是掺镱光纤激光器、铒镱光纤激光器及放大器的重要抽运源. 现在市面上已推出了各种类型的 980 nm 激光器, 如半导体激光器、固体激光器、光纤激光器等, 尤其是光纤激光器, 由于光束质量好、功率高、可全光纤化等优点, 已被广泛应用到各个领域. 目前市场上的高功率 980 nm 光纤激光器多为多模激光输出, 可以满足大部分工业化需求, 但多模光纤激光器的光束质量限制了其性能的发挥. 因此, 近年来对 980 nm 单模激光器的研究成为了热点.

目前 980 nm 单模激光主要通过单模增益光纤、双包层增益光纤、光子晶体增益光纤、全固带隙光子晶体光纤等实现单模激光输出, 并且输出功

率也在不断提升. 2000 年, 康宁公司 Zenteno 等^[1]采用了 1.1 W 的 946 nm Nd:YAG 固体激光器抽运 980 nm 单模光纤, 获得 979.8 nm 单模激光输出, 最大输出功率为 655 mW; 2008 年, 德国耶拿大学 Fabian 等^[2]利用高功率 915 nm LD 抽运 1.2 m 大模场棒状掺镱光纤, 获得输出功率 94 W 的 980 nm 连续激光; 2010 年, 北京工业大学李平雪等^[3]用 946 nm Nd:YAG 固体激光器抽运 36.5 cm 的掺镱光纤, 获得功率为 100 mW 的 980 nm 单模激光输出; 2011 年, 北京工业大学李平雪等^[4]采用 30 W 的 915 nm LD 抽运内包层直径分别为 170 和 200 μm 掺镱光子晶体光纤, 获得输出功率分别为 1.24 和 1.1 W 的 980 nm 连续激光. 2014 年, Leich 等^[5]通过使用长度为 0.95 m、纤芯直径为 10—126 μm 、数值孔径 NA 为 0.15 的锥形光纤, 以 915 nm 二极管作为抽运源, 获得效率为 31%、功率为 10 W 的 976 nm 单模激光输出; 2016 年,

* 广东重点领域研发计划 (批准号: 2018B010114002) 和国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB0407403) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xiacmm@126.com

俄罗斯科学院光纤研究中心 Ballato 等^[6]研发了一种 W 型纤芯折射率分布的掺镱光纤, 纤芯直径为 28 μm , 方形包层边长为 80 μm , 芯径与包层直径之比为 0.31, 获得了波长为 977 nm、功率为 5.5 W 的连续单模激光输出, 斜率效率为 25%; 2019 年, 国防科技大学杜赫庭等^[7]在实验中采用纤芯 60 μm , 包层直径 130 μm 的双包层掺镱光纤, 采用 976 nm 稳波长激光二极管作为种子源, 利用 915 nm 激光二极管作为抽运源, 在种子光功率为 3 W、抽运功率为 315 W 的条件下, 获得了功率为 113 W、斜率效率为 45% 的单模激光输出. 从以上分析可以看出, 尽管利用双包层增益光纤和光子晶体增益光纤可以有效获得 980 nm 单模激光输出, 并能够实现高功率激光输出, 但也面临着输出效率不高的问题. 因此, 采用新的方法和技术实现 980 nm 激光器单模输出, 并提高单模激光的输出功率, 将是拓展 980 nm 激光应用的有效途径. 由于空芯反谐振光纤既可以做到大纤芯又可以保持单模特性, 这为高功率 980 nm 单模光纤激光器激光的实现开辟了一个新的途径.

空芯反谐振光纤是近几年来各国科研机构、高校院所研究的热点之一, 由于其优异的光学特性如低非线性、超低群速度色散、低温度敏感性和高损伤阈值等, 使其在大功率激光传输、量子通信、传感、航空航天等多个领域有着潜在的应用^[8,9], 是未来最具发展潜力的特种光纤^[10,11]之一. 自 2011 年诞生以来, 世界各国已开发了不同种类的空芯反谐振光纤, 如冰淇淋结构^[12]、单环结构、多层结构^[13]、嵌套管结构^[14,15]和连接管结构^[16]等, 并且随着结构参数的不断优化, 光纤损耗不断降低. 2018 年, 北京工业大学和中国科学院物理研究所汪滢莹等^[16]联合报导了一种空芯连体光纤, 在 1512 nm 波段的传输损耗降低至 2 dB/km; 2019 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所于飞等^[17]将空芯反谐振光纤在 3.1 μm 处的传输损耗降低至 18 dB/km; 中国 2020 年, 南安普顿大学 Jasion 等^[18]以双琉璃管来嵌套反谐振无节点光纤, 实现了在 C+L 波段将传输损耗降低至 0.28 dB/km. 2021 年, OFC 会议上, 英国南安普顿大学 Tamura 等^[19]将五孔嵌套反谐振光纤损耗降到 0.22 dB/km, 与现在通信光纤损耗相接近, 为拓展气体激光器、高功率激光传输等应用创造了新的机遇.

本文结合空芯反谐振光纤优势, 开发出一种适

用于 980 nm 激光多模转单模的空芯反谐振光纤, 将其与传统 980 nm 多模激光器结合, 有效地提高模式转换效率, 并降低了 980 nm 单模激光器成本.

2 空芯反谐振光纤结构及导光机理

空芯反谐振光纤的典型结构端面图如图 1 所示^[20], 包层由一层空气孔组成, 各个毛细管之间无节点, 有效地减少了表面模对纤芯模式的损耗, 光纤在导光时, 光被限制在纤芯中传输, 最大程度地降低了固体介质对光纤的传输损耗. 其导光机理如图 2 所示^[21]. 包层内壁高折射率石英脉区构成的结构可视作一个法布里-珀罗 (F-P) 谐振腔, 在共振状态时 F-P 腔可视作透明状态, 光从包层泄漏出去; 而在反共振状态下, F-P 腔的反射系数很高, 可将光限制在纤芯当中.

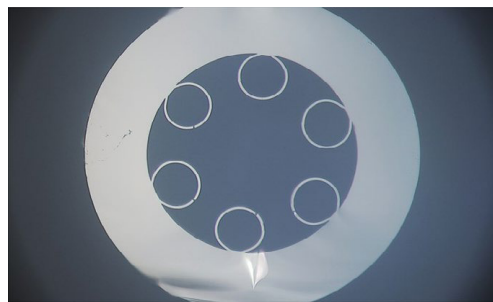


图 1 空芯反谐振光纤端面图^[20]

Fig. 1. Cross-section of hollow core anti-resonant fiber^[20].

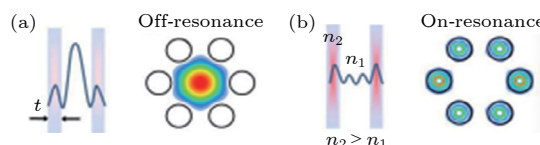


图 2 空芯反谐振光纤导光原理图^[21] (a) 反谐振; (b) 谐振
Fig. 2. Light guiding principles of hollow core anti-resonant fiber^[21]: (a) Antiresonant; (b) resonant.

空芯反谐振光纤的反谐振窗口位置表示为

$$\lambda_{\gamma} = \frac{2t}{m} \sqrt{n^2 - 1}, \quad (1)$$

式中, λ_{γ} 为反谐振波长; t 为石英脉区的宽度; n 为石英玻璃的折射率; m 为整数, 与波导的共振数相对应.

3 空芯反谐振光纤的制备

参照反谐振窗口公式, 得出特定谐振窗口波段的石英脉区 (即管壁厚 t) 为

$$t = \lambda_\gamma m / \sqrt{n^2 - 1}. \quad (2)$$

由此算出反谐振窗口为 980 nm, 波段 $t = 466$ nm; 设计纤芯包层管数量 n 影响到光纤的高阶模式 (higher order modes, HOMs) 损耗和弯曲损耗, 纤芯芯径大于 20 μm 的空芯光纤常用谐振效应将高阶模耦合到包层的模式中^[22], 其中通过限制包层管直径 d 与纤芯直径 D (最大内切圆接触管) 的比例 d/D 来抑制对 HOMs 对光纤的影响, 对于给定包层管数量 n 能够得到最大的比例 d/D , 表示^[23] 为

$$(d/D)_{\max}(n) = \frac{\sin(\pi/n)}{1 - \sin(\pi/n)} \quad (n \geq 3). \quad (3)$$

又因为当 $n \geq 8$ 时, $(d/D)_{\max}(n) \leq (d/D)_{\max}(8) = 0.62$, 折射率差距太大会导致 HOMs 无法与包层模式谐振耦合, 因此想通过谐振耦合实现对这些模式的抑制要使包层管数量 $n \leq 7$ ^[24,25], 由 Uebel 等^[25] 表明, 实现 6 孔空芯反谐振光纤设计 HOMs 抑制的最佳比例 $d/D \geq 0.62$. 设计 $D = 30 \mu\text{m}$, 根据 $d/D = 0.62$ 可得 $d = 18.6 \mu\text{m}$. 设立足够厚的外包层, 使得纤芯中的光场尽可能小的受到外包层光的散射影响, 这里外包层厚度为 15 μm , 内径 ID 为 50 μm , 外径 OD 为 65 μm . 设置好光纤预设计参数后, 使用 COMSOL 软件来模拟仿真得到光纤的模场分布, 得到光纤结构与模场分布如图 3 所示, 并计算出光纤的弯曲损耗和色散等参数来检验光纤的性能.

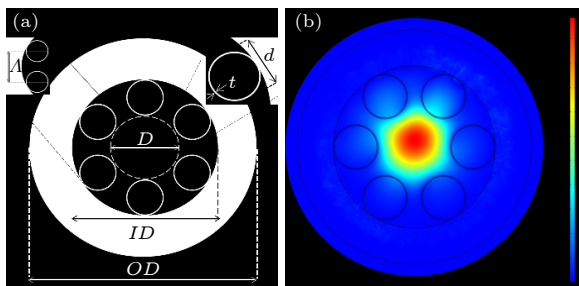


图 3 光纤设计结构与模场分析图 (a) 光纤结构设计图; (b) 光纤模场分析图

Fig. 3. Fiber design structure and mode field analysis: (a) Optical fiber structure design drawing; (b) optical fiber mode field analysis diagram.

为了计算结构的弯曲损失, 将弯曲结构转化为具有等效折射率剖面的结构, 其公式定义为

$$n_{\text{eq}} = n(x, y) \exp\left(\frac{x}{R}\right), \quad (4)$$

其中 R 为弯曲半径; x 为光纤弯曲方向; $n(x, y)$ 为等效结构下的折射率分布.

光纤弯曲时所造成的模式损耗可以用以下公式来计算^[26]:

$$L(\text{dB/m}) = \frac{4\pi}{\ln(10)\lambda} \text{Im}(\beta) = 8.686k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (5)$$

其中 β 为传播常数; k_0 为自由空间波数; $\text{Im}(\beta)$ 和 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 分别为传播常数和有效折射率的虚部. λ 为波长, 本文设 λ 为 980 nm^[27,28]. 通过 COMSOL 模拟仿真得出光纤沿不同方向弯曲时的模场分布和传输损耗如图 4 和图 5 所示.

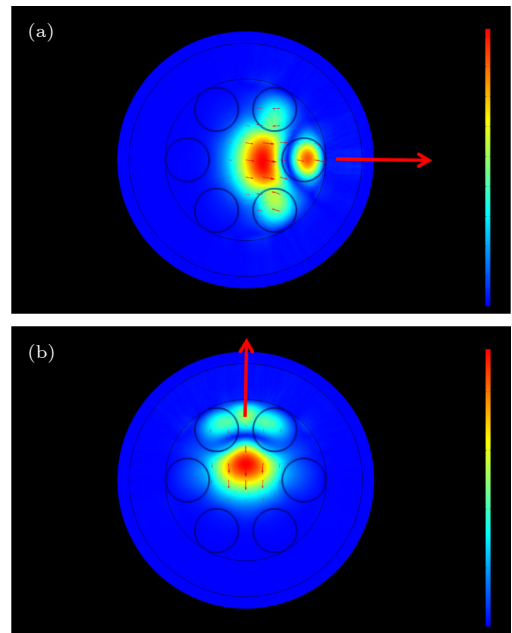


图 4 光纤 x 轴和 y 轴方向弯曲时的模场分布图 (a) 光纤沿 x 轴方向弯曲模场分布图; (b) 光纤沿 y 轴方向弯曲模场分布图

Fig. 4. Mode field distribution of optical fiber bending along x - and y - axis: (a) The distribution of bending mode field of optical fiber along the x -axis; (b) the distribution of bending mode field of optical fiber along the y -axis.

空芯反谐振光纤的波导色散与其结构有关, 改变光纤的结构可以得出不同的波导色散, 波导色散的公式可以表示为^[29]

$$D_w = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad (6)$$

其中 n_{eff} 为有效折射率; λ 为传播波长. 通过 COMSOL 软件来模拟仿真得到的光纤有效折射率以及由公式计算得出光纤的色散如图 6 和图 7 所示.

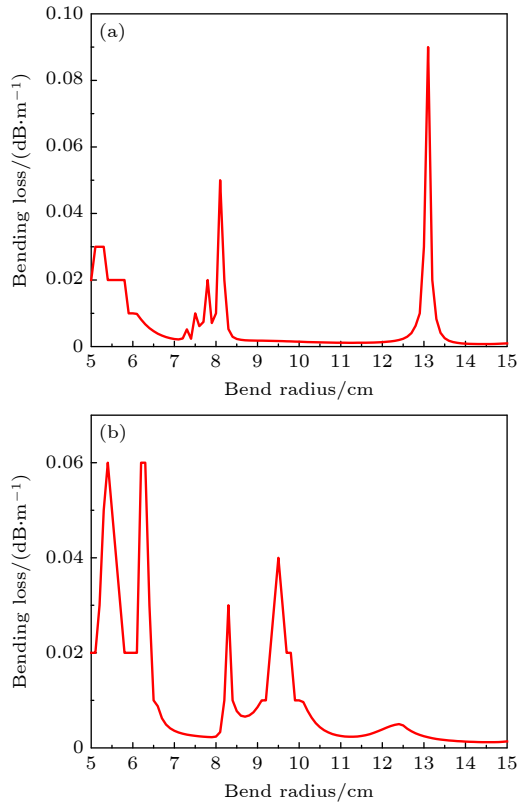


图 5 光纤沿 x 轴和 y 轴方向弯曲损耗图 (a) 光纤沿 x 轴方向弯曲损耗图; (b) 光纤沿 y 轴方向弯曲损耗图

Fig. 5. Bending loss diagram of optical fiber along x - and y -axis: (a) Fiber bending loss along the x -axis; (b) fiber bending loss along the y -axis.

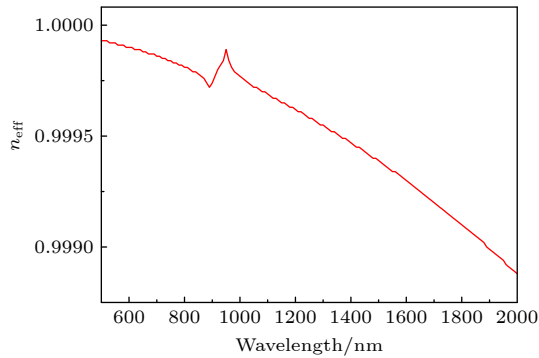


图 6 光纤有效折射率

Fig. 6. Effective refractive index of optical fiber.

根据需求, 结合光纤拉制工艺, 将符合参数的薄壁石英玻璃管用堆积方法制备成空芯反谐振光纤预制棒, 然后将预制棒置于实验室特种光纤拉丝塔上, 通过控制炉温及光纤拉丝参数, 拉制出所需的空芯反谐振光纤, 光纤端面结构如图 8 所示, 其具体参数如表 1 所列, 该光纤为六孔空芯反谐振光纤, 纤芯直径 D 为 30 μm , 包层壁厚 t 为 500 nm, 包层圆心距 A 为 21.4 μm . 根据壁厚, 利

用公式 (1) 式, 计算得出该光纤的反谐振窗口分别在 1024 ($m = 1$), 582 ($m = 2$), 395 ($m = 3$) 和 296 nm ($m = 4$).

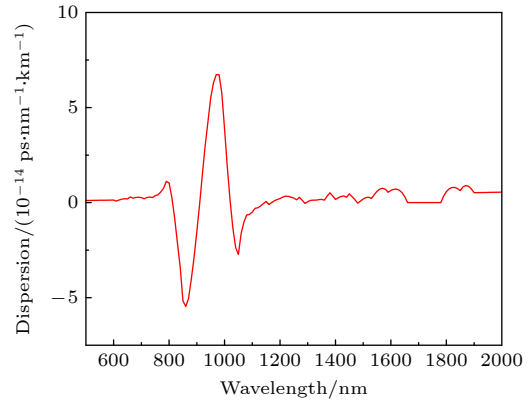


图 7 光纤色散图

Fig. 7. Dispersion diagram of optical fiber.

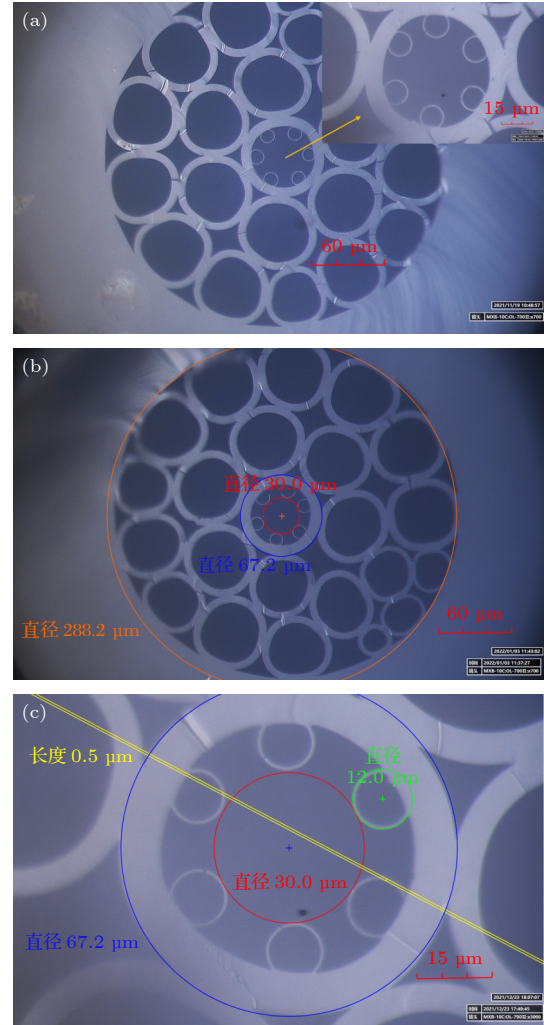


图 8 空芯反谐振光纤 SEM 端面图

Fig. 8. SEM cross-section of the hollow core anti-resonance fiber.

表 1 空芯反谐振光纤直径、包层壁厚、包层圆心距和反谐振窗口参数

Table 1. Hollow core anti-resonant fiber diameter, cladding wall thickness, cladding center distance and anti-resonance window parameters.

纤芯直径	包层壁厚	包层圆心距	反谐振窗口	
$D/\mu\text{m}$	t/nm	$A/\mu\text{m}$	λ_γ/nm (实际测量) ($t = 500\text{ nm}$)	λ_∞/nm (理论设计) ($t = 466\text{ nm}$)
30	500	21.4	1024 ($m = 1$)	979 ($m = 1$)
			582 ($m = 2$)	552 ($m = 2$)
			395 ($m = 3$)	368 ($m = 3$)
			296 ($m = 4$)	276 ($m = 4$)

4 空芯反谐振光纤性能分析

为了研究该空芯反谐振光纤的光学性能,以 NKT 超连续谱 (400—2400 nm, Superk compact, NKT) 作为光源,海洋光学 MAYA 光谱仪 (200—1100 nm) 作为接收端测试空芯反谐振光纤的传输谱.

图 9 为空芯反谐振光纤在可见及近红外波段 (400—1100 nm) 的传输谱,插图分别为其导光图,从图可以看出,光纤在可见及近红外波段存在 7 个导带,其中 1064 nm 为光源泵浦光,其余 6 个的导带中心波长分别位于 488, 582, 758, 866, 919 和 982 nm,其中 982 nm 波长处导带半高宽较宽,582 nm 波长处的导带半高宽较窄,其黄色的导光插图与中心波长 582 nm 的导光带相吻合.由图 9 可看出,光纤传输的峰值大体与设计相符合,但也出现了一些杂峰,其原因是光纤实际拉制而成的结构与理论设计存在一定偏差,如管壁厚以及纤芯直径等,从而实际光纤传输的峰值与理论间产生不同,属于工艺制造问题,通过优化拉制工艺能够进一步修正光纤结构的误差.

采用截断法测量该空芯反谐振光纤的损耗如

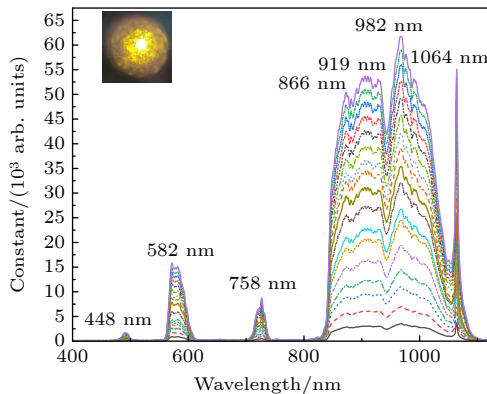


图 9 空芯反谐振光纤传输谱图

Fig. 9. Transmission spectrum of hollow core anti-resonance fiber.

图 10 所示,从图中可以看出,其损耗最低点和传输谱峰值基本吻合.该光纤在 982 nm 波段的损耗为 0.32 dB/m,损耗比较大,其主要原因是该光纤包层采用单包层石英环,从而增加了光纤损耗.从损耗上来说,该光纤损耗相对比较大,并不能在通信上得到应用,但作为光学器件的研究,该光纤可以实现高能激光的短距离传输,如 980 nm 高功率激光传输.

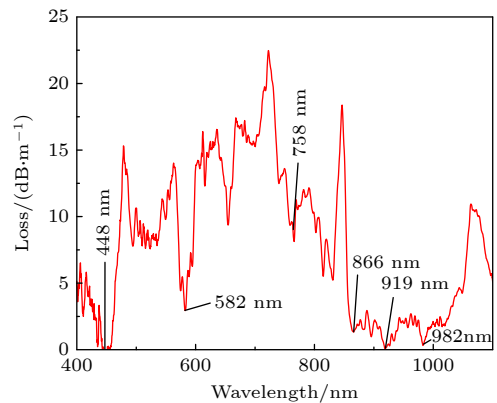


图 10 空芯反谐振光纤的传输损耗图

Fig. 10. Transmission loss diagram of hollow core anti-resonance fiber.

为了验证空芯反谐振光纤的模式转换能力,搭建了如图 11 所示的模式转化装置,所用激光器 (MXLS-976-50-2-N-D, MAX) 为最大输出功率为 50 W 的 980 nm 多模光纤激光器,其输出纤芯直径为 200 μm , 980 nm 激光采用准直输出.利用 Thorlabs 光束质量分析仪记录了空芯反谐振光纤模式等性能参数.实验中所用光纤长度为 3 m.为了提高耦合效率,将 50/125 多模光纤拉锥制备成一根锥形光纤,通过使用 Fujikura LZM-100 光纤熔接机将一根 50/125 的多模光纤进行拉锥操作,将多模光纤中的一段芯径拉制成 30 μm ,使其与光纤的纤芯直径大小基本一致,然后用光纤切割机在多模光纤的拉锥线段进行切割得到一段多模锥形

光纤, 再使用熔接机将这段锥形多模光纤与空芯反谐振光纤进行熔接. 图 12 展示了空芯反谐振光纤多模与单模转化效率图及 980 nm 单模激光模式, 其中图 12(a) 为光纤多模转单模效率图, 图 12(b) 和图 12(c) 为多模光纤激光器二维和三维模式图, 图 12(d) 和图 12(e) 为空芯反谐振光纤 980 nm 单模激光二维和三维模式图. 从图 12(b) 和图 12(c) 可以看出, 多模激光经过锥形光纤依然保持着多模特性, 而从图 12(d) 和图 12(e) 中可以看出, 经过 3 m 长的空芯反谐振光纤后, 其模式呈现单模状态. 从图 12(a) 中可以看出, 经过空芯反谐振光纤可以实现从多模激光到单模激光, 其转换效率约 47.5 %, 目前由于实验条件限制获得单模激光输出功率为 7.643 mW.

为了衡量光纤输出光束的质量我们可以通过计算 M^2 因子来进行判断, 计算方法选择光束质量

标准的两点法来测 M^2 因子 [30]. 首先用透镜将激光束进行聚焦, 然后距离透镜主平面为 f 处测量光斑半径 ω_f , 可得出激光束的 $\theta = \omega_f/f$, 然后测量光束聚焦到最小时的光斑半径 ω_0 和此处距离透镜主平面的距离 s , 可得出激光束的腰斑半径 $\omega = \omega_0 f/(s-f)$, M^2 因子的公式表示为

$$M^2 = \frac{\text{实际光束的腰斑半径与远场发散角的乘积}}{\text{基模光束的腰斑半径与远场发散角的乘积}} \quad (7)$$

对于基模高斯光束的腰斑半径与发散角的乘积可以表示为

$$\omega\theta = \lambda/\pi. \quad (8)$$

为保证数据准确, 分别测量未经过光纤传输的光束质量参数和经过长度为 3 m 的反谐振光纤传输后的光束质量参数, 测试多组数据减少误差, 测量的数据如表 2 和表 3 所列. 将上述表中测得的数

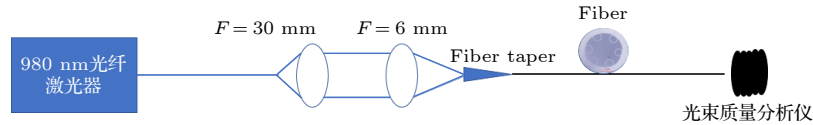


图 11 980 nm 多模光纤激光器转单模激光装置示意图

Fig. 11. Schematic diagram of 980 nm multi-mode fiber laser to single-mode laser device.

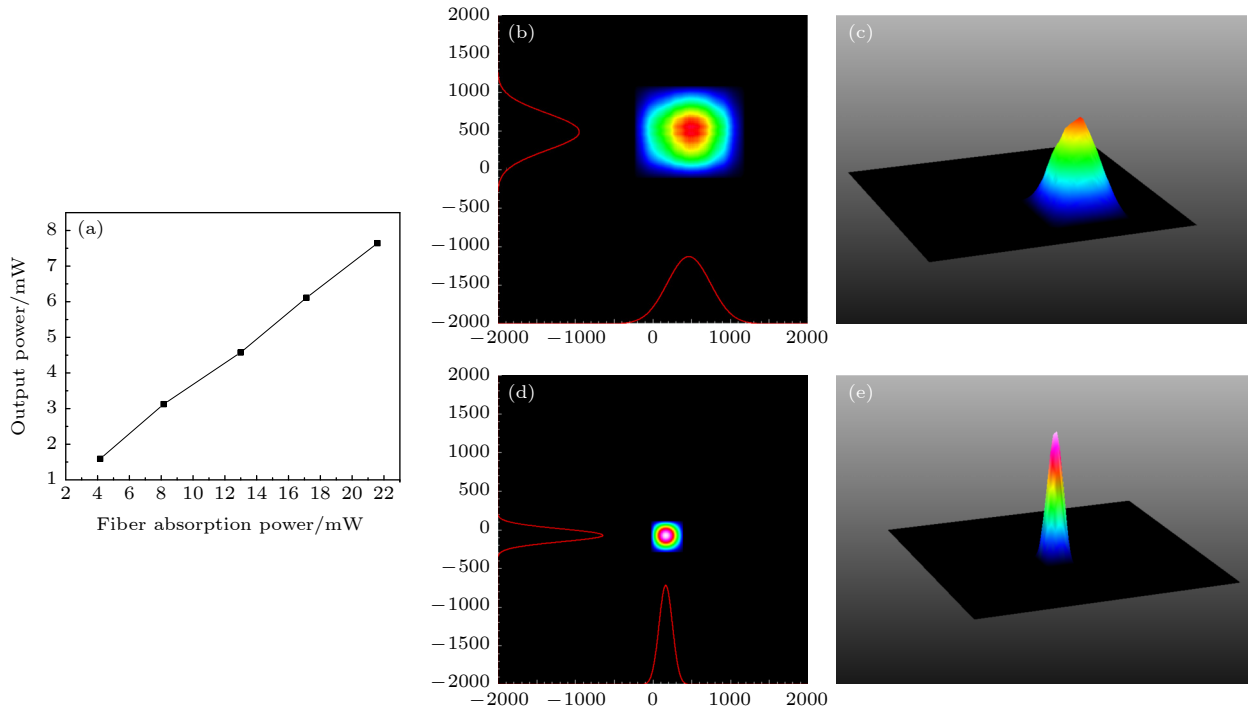


图 12 空芯反谐振光纤多模与单模转化效率图及 980 nm 单模激光模式 (a) 光纤多模转单模效率图; (b), (c) 经锥形光纤模式多模激光模式图; (d), (e) 经空芯反谐振光纤激光模式图

Fig. 12. Multi-mode and single-mode conversion efficiency of hollow core anti-resonance fiber: (a) Efficiency of fiber from multi-mode to single-mode; (b), (c) multi-mode laser modes after tapered fiber mode; (d), (e) laser patterns of hollow core anti-resonant fiber.

表 2 未经过光纤传输后的光束质量测量参数

Table 2. Measurement parameters of beam quality without optical fiber transmission.

参数测量组	$f = 0.3$	$f = 0.4$	$f = 0.45$	$f = 0.5$	$f = 0.6$	$s = 0.7$
f/mm	0.3	0.4	0.45	0.5	0.6	0.7
ω/mm	1.1	0.95	0.92	0.78	0.39	0.29

表 3 经过光纤传输后的光束质量测量参数

Table 3. Measurement parameters of beam quality through by optical fiber transmission.

参数测量组	$f = 1.2$	$f = 1.3$	$f = 1.5$	$f = 1.6$	$f = 1.8$	$s = 2.3$
f/mm	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.3
ω/mm	1.09	0.96	0.9	0.73	0.63	0.4

据带入公式进行计算, 得到未经过光纤传输的光束质量 M_1^2 因子在 3.4 左右, 而经过光纤传输后的光束质量 M_2^2 因子在 1.41 左右, 可以看出光束质量得到提高, 反谐振光纤起到了多模转化为单模的作用.

5 总 结

本文利用堆积法制备了适用于 980 nm 传输的空芯反谐振光纤, 并对其性能进行了测试, 研究了在模式转换领域的应用. 该空芯反谐振光纤壁厚控制在纳米量级, 在可见及近红外波段实现了很好的导光特性, 为空芯反谐振光纤导光及高功率激光传输等方面应用奠定基础. 实验表明, 制备的空芯反谐振光纤可有效地将 980 nm 多模激光转化成单模激光, 由于空芯反谐振光纤既可以做到大纤芯又可以保持单模特性, 这为高功率 980 nm 单模光纤激光器的实现开辟了一个新的途径.

参考文献

- [1] Zenteno L A, Minelly J D, Dejneka M, Crigler S 2000 *Adv. Solid State Lasers, Proc.* **34** 440
- [2] Rser F, Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2008 *Opt. Express* **16** 22
- [3] Li P X, Zou S Z, Zhang X X, Bai Z A, Li G 2010 *Opt. Laser Technol.* **42** 8
- [4] Li P X, Zhang X X, Liu Z, Chi J J 2011 *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011-Laser Sensing and Imaging and Biological and Medical Applications of Photonics Sensing and Imaging* Beijing, Peoples R China, May 24–26, 2011 p81921W
- [5] Leich M, Jaeger M, Jager M, Grimm S, Hoh D, Jetschke S, Becker M, Hartung A, Bartelt H 2014 *Laser Phys. Lett.* **11** 4
- [6] Ballato J, Aleshkina S S, Likhachev M E, Lipatov, D S 2016 *Conference on Fiber Lasers XIII -Technology, Systems, and Applications* San Francisco, CA, February 15–18, 2016 p97281C
- [7] Du H T, Liu A M, Cao J Q, Pan Z Y, Huang Z H, Wang X L, Xu X J, Chen J B 2019 *High Power Laser Part. Beams* **268** 10 (in Chinese) [杜赫庭, 刘爱民, 曹润秋, 潘志勇, 黄值河, 王小林, 许晓军, 陈金宝 2019 强激光与粒子束 **268** 10]
- [8] Paul B K, Ahmed K, Vigneswaran D, Sen S, Islam M S 2019 *Opt. Quantum Electron.* **51** 7
- [9] Qin J Y, Zhu B, Du Y, Han Z H 2019 *Opt. Fiber Technol.* **52** 101990
- [10] Cai W, He W H, Wang J Y, Zhou Y G, Liu Y M 2021 *Vac. Electron.* **3** 8 (in Chinese) [蔡伟, 郝文慧, 王舰洋, 周彦果, 刘铁铭 2021 真空电子技术 **3** 8]
- [11] Stefani A, Fleming S C, Kuhlmeier B T 2018 *APL Photonics* **3** 5
- [12] Yu F, Wadsworth W J, Knight J C 2012 *Opt. Express* **20** 10
- [13] Huang X, Yoo S, Yong K T 2017 *Sci. Rep.* **7** 1
- [14] Kosolapov A F, Alagashev G K, Kolyadin A N, Pryamikov A D, Biriukov A S, Bufetov I A, Dianov E M 2016 *Quantum Electron.* **46** 3
- [15] Bradley T D, Jasion G T, Hayes J R, Chen Y, Hooper L, Sakr H, Alonso M, Taranta A, Saljoghei A, Mulvad H C, Fake M, Davidson I A K, Wheeler N V, Fokoua E N, Wei Wang, Sandoghchi S R, Richardson D J, Poletti F 2019 *45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)* Dublin, Ireland, Sept 22–26, 2019 p4
- [16] Gao S F, Wang Y Y, Ding W, Jiang D L, Gu S, Zhang X, Wang P 2018 *Nat. Commun.* **9** 1
- [17] Yu F, Song P, Wu D K, Birks T, Bird D, Knight J 2019 *APL Photonics* **4** 8
- [18] Jasion G T, Bradley T D, Harrington K, et al. 2020 *Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)* San Diego, CA, Mar 08–12, 2020
- [19] Tamura Y, Sakuma H, Morita K, Suzuki M, Yamamoto, Y, Shimada K, Honma Y, Sohma K, Fujii T, Hasegawa T 2018 *J. Lightwave Technol.* **36** 1
- [20] Markos C, Nielsen K, Bang O 2015 *J. Opt.* **17** 10
- [21] Markos C, Travers J C, Abdolvand A, Eggleton B J 2017 *Rev. Mod. Phys.* **89** 4
- [22] Fini J M, Nicholson J W, Mangan B, Meng L L, Windeler R S, Monberg E M, Desantolo A, Dimarcello F V, Mukasa K 2014 *Nat. Commun.* **5** 5085
- [23] Michieletto M, Lyngso J K, Jakobsen C, Laegsgaard J, Bang O, Alkeskjold T T 2016 *Opt. Express* **24** 7
- [24] Wei C L, Kuis R A, Chenard F, Menyuk C R, Hu J 2015 *Opt. Express* **23** 12
- [25] Uebel P, Gunendi M, Frosz M H, Ahmed G, Edavalath N N, Menard J M, Russell P S J 2016 *Opt. Lett.* **41** 9
- [26] Kumar A, Saini T S, Naik K D, Sinha R K 2016 *Appl. Opt.* **55** 19
- [27] Kabir S, Razzak S M A 2018 *Optik* **162** 206
- [28] Kabir S, Razzak S M A 2019 *Photonics Nanostruct. Fundam.*

Preparation and mode conversion application of narrowband hollow-core anti-resonant fiber^{*}

Yang Jia-Hao Zhang Ao-Yan Xia Chang-Ming[†] Deng Zhi-Peng
Liu Jian-Tao Huang Zhuo-Yuan Kang Jia-Jian Zeng Hao-Ran
Jiang Ren-Jie Mo Zhi-Feng Hou Zhi-Yun Zhou Gui-Yao

(School of Information Optoelectronics Technology, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

(Received 28 November 2021; revised manuscript received 17 March 2022)

Abstract

Owing to the unique characteristics of the hollow core fiber(HCF), more and more researchers pay attention to its application. Because the mode field is mainly limited to the core region of the fiber, which results in low non-linearity, ultra-low group velocity dispersion, low temperature sensitivity, and high material damage threshold. Based on the above, the HCF possesses some attractive nonlinear applications such as in transmission of high-power laser beams, sensing, ultra-wide band low-loss transmission, pulse compression and super-continuum generation. Besides, the HCFs can be further divided into the transmitting band-gap photonic crystal fiber(PBG-PCF) and the hollow-core anti-resonant fiber(HC-ARF). Compared with the PBG-PCF, the latter has wide light guiding characteristics caused by leaking modes. According to the research in the recent year, the HC-ARF has gradually approached to the performance of the PBG-PCF in its transmission loss, showing that it has potential applications in communications, sensing, aerospace, high-power laser transmission and other fields in the future. In addition, the HC-ARF with the special light-guiding properties has also become the important photonic device in the fields of fiber filters, mode conversion, etc. In this paper, a hollow-core anti-resonance fiber is studied and its light transmission performance in the spectral range of 500–1500 nm is verified. The optical loss measured at 980 nm wavelength is about 0.32 dB/m. It is found that a 980 nm multi-mode laser beam can be converted into a single-mode one after transmitting through the hollow core fiber we designed.

Keywords: fiber optics, anti-resonance, light guide characteristics, mode conversion

PACS: 42.81.-i, 42.70.-a, 42.81.Gs, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.70.20212194

^{*} Project supported by the Research and Development Program in Key Area of Guangdong Province, China (Grant No. 2018B010114002), and the Key Research and Development Program of China (Grant No. 2018YFB0407403).

[†] Corresponding author. E-mail: xiacmm@126.com