

# 激光与光电子学进展

## 3 $\mu\text{m}$ 波段低损耗抗弯曲反谐振空芯光纤设计

张家强, 张敏\*, 尹金德, 林海枫, 闫培光

深圳大学物理与光电工程学院深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060

**摘要** 为实现低损耗、抗弯曲的中红外激光传输, 在 3  $\mu\text{m}$  波段研究超低损耗空芯嵌套式反谐振无节点光纤, 采用有限元法对空芯光纤的结构参数(管厚、包层毛细管外径、纤芯直径和嵌套管外径)进行数值仿真, 并在 3  $\mu\text{m}$  波段实现低至 0.52 dB/km 的光纤传输损耗。通过对空芯反谐振光纤和空芯嵌套式反谐振无节点光纤的弯曲损耗及泄漏损耗的对比研究, 证明空芯嵌套式反谐振无节点光纤相比于空芯反谐振光纤在宽光谱范围内具有更低的传输损耗(损耗比最高可达 22.87 dB)、更好的抗弯曲性能(弯曲半径为 6.5 cm 的损耗小于 0.1 dB/m)。

**关键词** 光学器件; 中红外; 反谐振; 低损耗; 抗弯曲; 空芯光纤

中图分类号 TN253; TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1723001

### Design of Low Loss Hollow-Core Anti-Resonance Fiber for 3 $\mu\text{m}$ Spectral Region

Zhang Jiaqiang, Zhang Min\*, Yin Jinde, Lin Haifeng, Yan Peiguang

Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

**Abstract** In order to achieve low-loss and bending-resistant mid-infrared laser transmission, the ultra-low-loss hollow-core nested anti-resonant nodeless fiber is studied in the 3  $\mu\text{m}$  band, and the structural parameters of the hollow-core fiber (tube thickness, outer diameter of cladding capillary, core diameter, and nested tube outer diameter) are used for numerical simulation, and the optical fiber transmission loss as low as 0.52 dB/km is achieved in the 3  $\mu\text{m}$  band. By comparing the bending loss and leakage loss of the hollow core anti-resonant fiber and the hollow core nested anti-resonant nodeless fiber, it is prove that the node-less hollow core anti-resonance fiber has lower transmission loss (loss ratio up to 22.87 dB) and better bending resistance (the loss is less than 0.1 dB/m when the bending radius is 6.5 cm) than the hollow core anti-resonance fiber.

**Key words** optical devices; mid-infrared; anti-resonance; low loss; counter bending; hollow-core fiber

**OCIS codes** 230.2285; 060.2280; 140.3510

## 1 引言

中红外光谱区域不仅涵盖了衰减最小的大气红外窗口, 还覆盖了众多原子和分子的吸收峰, 为

此中红外激光技术在通信、传感、医疗及军事等诸多领域具有重要的应用需求。使用光纤传导激光在确保柔性传输的同时, 能够有效隔绝大部分外界环境的干扰, 从而保证传输信息的质量、稳定性和

收稿日期: 2020-12-23; 修回日期: 2021-01-05; 录用日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61775146)、广东省自然科学基金(2016A030310305)、深圳市技术攻关项目(JS-GG20160429114438)

通信作者: \*zhangmin@szu.edu.cn

保密性。然而在中红外波段,熔石英光纤因具有本征缺陷,所以传输损耗极大;氟化物玻璃光纤和硫系玻璃光纤具有较低的传输损耗,但存在熔点较低、热稳定性差、抗弯曲性能差以及制备工艺尚不成熟等不足<sup>[1]</sup>;单晶蓝宝石光纤虽然能够承受较高能量的中红外激光传导,但其价格昂贵,制备长度短,难以获得单模传导的光纤。2011年俄罗斯科学院使用空芯光纤实现了波长大于 $3.5\ \mu\text{m}$ 的中红外激光的低损耗传输<sup>[2]</sup>,该光纤的包层采用单层无接触的微管结构并规则悬挂于更大的环形套管内壁,微管厚度满足反谐振的条件,因此该类光纤被称为空芯反谐振光纤(Hollow-Core Anti-Resonant Fiber, HC-ARF)。由于各个微管之间无节点,所以极大地减少了表面模对纤芯模式的损耗,而传输损耗的降低会增大传输中红外激光的能量。即便采用石英玻璃材质的微管,但超过99%的中红外激光能量被限制在中空的纤芯中,为此极大地降低了固体介质材料的缺陷对光纤性能的影响,从而可以实现低非线性、低色散和低时间延迟的光传输<sup>[3]</sup>。同时,HC-ARF更容易实现大的中空纤芯区域,将其作为光与物质相互作用的介质平台可以与填充物质实现长距离和大面积的接触,从而显著增强光与物质的相互作用<sup>[4-6]</sup>。综上可知,中红外HC-ARF的研究有助于推动中红外激光在传感、通信和生物等多个领域的发展。

近年来,HC-ARF的传输损耗不断降低。在可见光波段,北京工业大学汪滢滢团队<sup>[7]</sup>使用无节点结构的空芯光纤实现了 $532\ \text{nm}$ 波长处的低传输损耗( $80\ \text{dB/km}$ );在通信波段,北京工业大学和中国科学院物理研究所组成的联合团队报道了一类空芯连体光纤,其能够在 $1512\ \text{nm}$ 波长处将传输损耗降至 $2\ \text{dB/km}$ <sup>[8]</sup>。南安普敦大学采用了双琉璃管嵌套反谐振无节点光纤(Nested Anti-Resonance Nodeless Fiber, NANF)技术,可以将空芯光纤在C+L波段( $1530\sim 1625\ \text{nm}$ )的传输损耗降至 $0.28\ \text{dB/km}$ <sup>[9]</sup>。在中红外波段,英国巴斯大学制备了低弯曲损耗的HC-ARF,在 $3.1\ \mu\text{m}$ 波长处实现了 $100\ \text{dB/km}$ 的传输损耗<sup>[10]</sup>。2019年,中国科学院上海光学精密机械研究所将 $3.1\ \mu\text{m}$ 波长处的传输损耗降低至 $18\ \text{dB/km}$ <sup>[11]</sup>,虽然对中红外波段的激光传输光纤有所研究,但目前实现低损耗和抗弯曲的性能还有待研究,抗弯曲性能在柔性使用和抗扰动特性中具有重大的意义,因此有必要对该波段激光传输光

纤的损耗及弯曲特性进行进一步的研究。

由于光纤包层毛细管处于反谐振状态,表面散射损耗(SSL)在这类光纤中非常低,通常可以忽略<sup>[12]</sup>。二氧化硅玻璃在中红外波段将变得不透明且具有高吸收性,研究结果表明基于二氧化硅玻璃材料的HC-ARF在中红外波段的传输损耗每千米达到数十分贝<sup>[11, 13-15]</sup>。但在中红外波段,即材料的传输损耗低于 $100\ \text{dB/m}$ 的 $3\ \mu\text{m}$ 波段,仍可利用纤芯边界的负曲率来减少光纤的传输损耗。通过掺杂 $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Ho}^{3+}$ 或两者与 $\text{Pr}^{3+}$ 共掺等可以输出波长为 $2.7\sim 3.0\ \mu\text{m}$ 的激光,其用于切割多水分的生物软组织以及骨骼,在激光手术中应用具有创面小和凝血迅速的优点<sup>[16]</sup>。然而光纤在上述应用过程中往往无法避免弯曲的问题,而弯曲会引入弯曲损耗。随着弯曲半径的减小,弯曲损耗将成为传输损耗的主导因素之一,甚至直接影响激光的传输模式。针对空芯光纤在中红外波段的弯曲损耗对实际应用范围和效率的重要影响,本文重点对该问题进行探讨。

为了实现 $3\ \mu\text{m}$ 波段激光的柔性传输,本文采用有限元法和保角变换技术研究 $3\ \mu\text{m}$ 波段的低损耗抗弯曲HC-NANF,并且在基模的电场分布、管间的电场强度、弯曲损耗及泄漏损耗方面对其进行研究,结果表明该类型光纤有望取代传统的实芯光纤,并且在激光传输、光纤传感和生物医疗等领域具有广阔的应用前景。

## 2 光纤设计

### 2.1 包层毛细管外径与纤芯直径的确定

本文研究的反谐振空芯光纤是在具有无节点的包层毛细管结构的基础上增加了嵌套管,并在相同的方位角处附着于包层,嵌套管和包层毛细管的厚度都满足反谐振反射光波导模型<sup>[17]</sup>的反谐振条件,即 $t = [(m - 0.5)\lambda] / 2\sqrt{n_{\text{glass}}^2 - n_{\text{air}}^2}$ ,其中 $m$ 为光纤的传输带宽, $n_{\text{glass}}$ 为光纤玻璃介质的折射率, $n_{\text{air}}$ 为光纤空气层的折射率, $t$ 为光纤玻璃介质的厚度, $\lambda$ 为光纤的传输光波长。光纤的制作材料选用F300型熔融二氧化硅<sup>[18-19]</sup>,其折射率的实部在 $3\ \mu\text{m}$ 波段处为 $1.419$ ,材料损耗为 $55.62\ \text{dB/m}$ ,最终的管厚为 $0.75\ \mu\text{m}$ 。

与已得到广大科研工作者认可的六环相比,七环为高功率激光传输应用所需的最佳组合之一<sup>[20]</sup>。图1(a)为所设计的NANF结构,其中 $D$ 为纤芯直

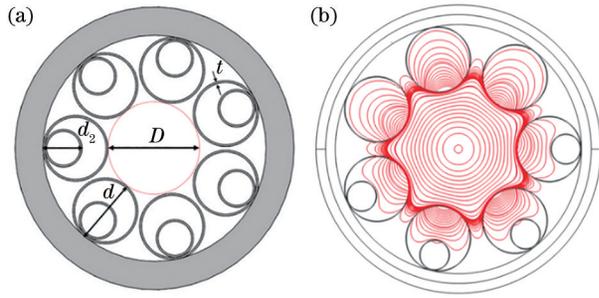


图 1 光纤的剖面图。(a) NANF 的结构;(b) 电场强度等高线的模拟图

Fig. 1 Profile of optical fiber. (a) Structure of NANF; (b) simulation of electric field intensity contour

径,  $d_2$  为嵌套管外径,  $d$  为包层毛细管外径。图 1(b) 为利用反谐振层改善对纤芯模式限制的模拟图。三种空芯光纤(纤芯直径均为  $120\ \mu\text{m}$ ) 中沿  $x$  方向和  $-x$  方向的归一化基模电场分布如图 2 所示, 其中  $E$  为基模电场。从图 2(a) 可以看到, HCF(Hollow-Core Fiber) 并不能将光很好地限制在纤芯区域。从图 2(b) 可以看到, 对于 ARF, 电场在管间隙的衰减比反谐振环大, 说明反谐振环对纤芯模式能够起到很好的限制作用。通过对比图 2(e) 和图 2(f) 可以得到, ARF 中外部玻璃边界处的电场强度比光纤中心低约为  $10^{-4}$ ; 对于 NANF, 电场强度则降低到  $10^{-5}$  以下, 这会导致泄漏损耗显著降低。

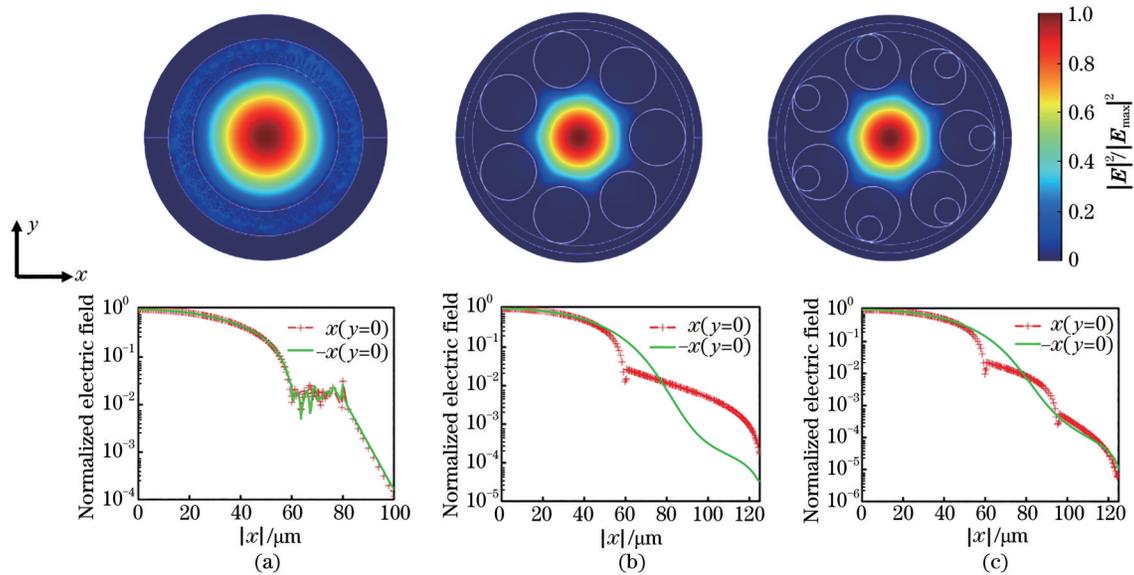


图 2 三种类型光纤的基模归一化电场分布图以及沿不同方向的电场变化曲线。(a) HCF;(b) ARF;(c) NANF

Fig. 2 Fundamental mode normalized electric field distributions and electric field variation curves along different directions of three types of optical fibers. (a) HCF; (b) ARF; (c) NANF

HC-NANF 是在 HC-ARF 的基础上增加了嵌套管, 为此先要确定 HC-ARF 的最优结构参数。根据目前的光纤制备工艺, 纤芯直径是有限的, HC-ARF 的纤芯直径通常在工作波长的  $20\sim 50$  倍之间<sup>[11, 21-22]</sup>。根据 Bird<sup>[23]</sup> 提出的模型, 可以近似得到空气和包层毛细管玻璃层的横向相位滞后, 表达式为

$$\phi_a = \frac{2\pi\omega_a}{\lambda} \sqrt{1 - \text{Re}(n_{\text{eff}})^2} \approx 2u_0 \frac{d}{D}, \quad (1)$$

$$\phi_g = \frac{2\pi\omega_g}{\lambda} \sqrt{n_{\text{glass}}^2 - \text{Re}(n_{\text{eff}})^2} \approx \frac{2\pi\sqrt{n_{\text{glass}}^2 - 1}}{\lambda} t, \quad (2)$$

式中:  $\phi_a$  和  $\phi_g$  分别为空气层和玻璃层的相位滞后;  $\omega_a$  为空气层的宽度, 近似为  $d$ ;  $\omega_g$  为玻璃层的宽度, 近似为  $t$ ;  $n_{\text{eff}}$  为基模的有效折射率;  $u_0$  为第一类贝塞尔函数的零根;  $\text{Re}(\cdot)$  为取实部。根据(1)式

和(2)式可知, 空气区域的相位滞后主要由  $d/D$  决定, 而玻璃层的相位滞后与  $t$  密切相关, 其中最佳的  $t$  值为  $0.75\ \mu\text{m}$ 。为了研究包层反谐振对 HC-ARF 材料损耗的影响, 固定纤芯直径为  $100\ \mu\text{m}$  后对  $d$  进行参数化扫描, 从而得到最佳的  $d/D$ , 最佳值为  $0.33$ 。

纤芯基模损耗与包层毛细管外径的关系如图 3 所示。从图 3 可以看到, 当  $d/D=0.56$  时, 光纤损耗最小, 而通过(1)式和(2)式得到的  $d/D$  值为  $0.33$ , 这是由 Bird<sup>[23]</sup> 提出的模型与无节点 HC-ARF 之间的差异造成的; 当  $d$  从小变大时, 光纤损耗呈先减小后增加的趋势, 原因在于  $d$  的减小使得光纤包层外的护套更接近纤芯, 但这会增大光纤泄漏损耗, 同时  $d$  的减小则对应于管间距的增加, 这会造成光发

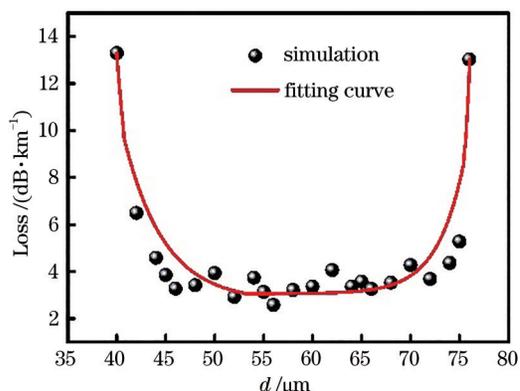


图 3 纤芯基模损耗与包层毛细管外径的关系

Fig. 3 Relationship between core fundamental mode loss and outer diameter of cladding capillary

生泄漏。最后,包层毛细管总周长的减小,增加了空气层模态与玻璃层模态之间的空间重叠,即增加了耦合强度,从而导致空气层模态存在损耗<sup>[24-25]</sup>。

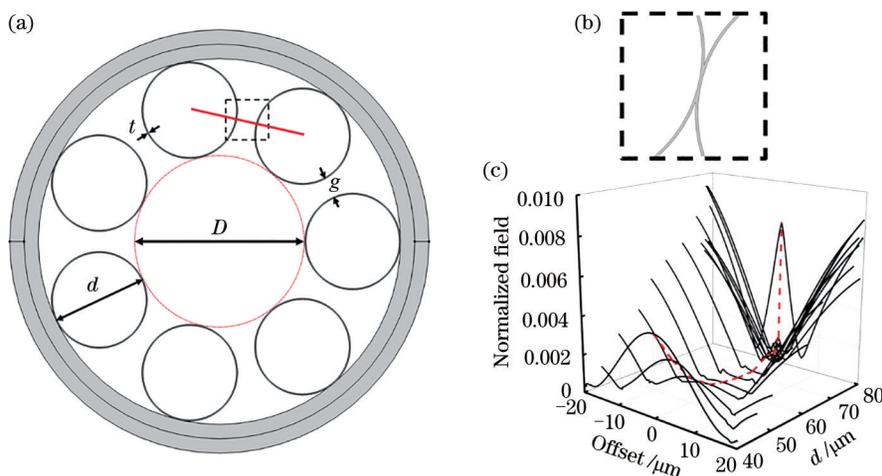


图 4 光纤结构与管间隙归一化电场强度的关系。(a) HC-ARF 的结构;(b)  $g = -t$  的管间结构;(c) 沿图(a)实线的归一化电场强度与  $d$  的关系

Fig. 4 Relationship between fiber structure and normalized electric field intensity in tube gap. (a) Structure of HC-ARF; (b) inter-tube structure with  $g = -t$ ; (c) relationship between normalized electric field intensity along solid line of Fig. (a) and  $d$

在实际应用中,增大纤芯直径是降低 HC-ARF 泄漏损耗的最有效手段之一,因此对光纤损耗与纤芯直径之间的关系进行数值仿真即可得到最佳的纤芯直径,固定  $d/D$  值和  $t$  值后对  $D$  进行参数化扫描可以得到光纤损耗与纤芯直径的关系,变化曲线如图 5 所示。从图 5 可以看到,光纤损耗遵循  $\lambda^a / (D/2)^{(a+1)}$  缩放的定律<sup>[26]</sup>,其中  $a$  为空气介质的层数;当纤芯直径大于  $120 \mu\text{m}$  时,光纤损耗基本不变,由于纤芯直径的增大会带来泄漏损耗的增大,因此  $D$  的最佳值为  $120 \mu\text{m}$ 。

在实际的光纤制备过程中,当  $d$  增加到一定程度时,包层毛细管之间由于表面张力会形成局部节点,进而极大地增加了光纤损耗。

HC-ARF 结构如图 4(a) 所示。管间距  $g$  与  $D$ 、 $d$  和包层毛细管数  $p$  的关系<sup>[22]</sup>可表示为

$$g = (D + d) \sin(\pi/p) - d. \quad (3)$$

当  $g = -t$  时,则  $d = 77.97 \mu\text{m}$ ,此时包层毛细管的结构如图 4(b) 所示。图 4(a) 中实线的归一化电场强度与  $d$  的关系如图 4(c) 所示。从图 4(c) 可以看到,当  $g < 0$  时,大部分的电场集中在包层毛细管中,表明了纤芯基模与毛细管管模之间的相位匹配状态,这会导致高传输损耗;对于较小的管间距,反谐振的毛细管将电场从其周围区域驱除,这会导致很小一部分的功率通过毛细管发生泄漏,因此损耗很小;当管间距大于最佳值时,泄漏增加,即泄漏损耗增加。

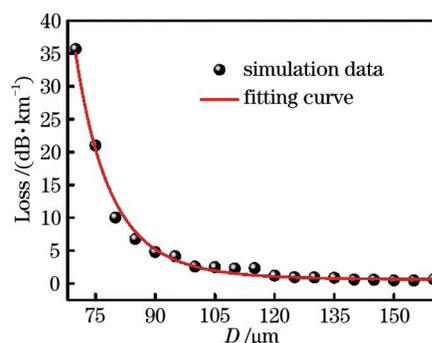


图 5 纤芯基模损耗与纤芯直径的关系

Fig. 5 Relationship between core fundamental mode loss and core diameter

## 2.2 嵌套管结构的确定

为了寻找最优的 NANF 结构参数,在 HC-ARF 最优结构参数的基础上,对  $d_2$  进行参数化扫描可以得到光纤损耗与  $d_2$  的关系,变化曲线如图 6 所示。从图 6 可以看到,当  $d_2$  值逐渐减小时,嵌套管逐渐远离纤芯,则其对纤芯光不能起到很好的限制作用,故损耗会变大;当  $d_2$  值增大到一定程度时,嵌套管的直径与包层毛细管相当,这会导致两个玻璃环的接近区域逐渐变大,从而形成类似带有空气缺陷的厚玻璃环,进而增大光纤损耗。同时,受限于玻璃表面应力,控制光纤过程中也会由直径相当的嵌套管与包层毛细管而形成结合区,只有当  $d_2$  值约为  $d$  的一半时才能达到最佳的效果,结果显示当  $d_2$  值约为  $31 \mu\text{m}$  时,光纤损耗最小,达到  $0.52 \text{ dB/km}$ 。

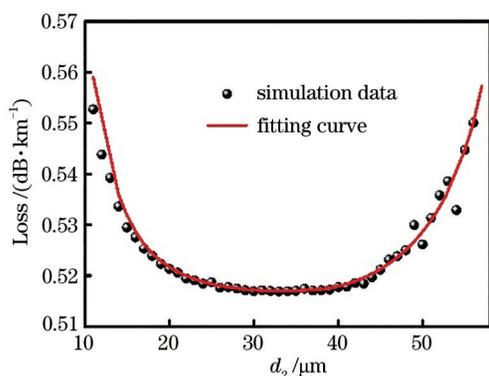


图 6 纤芯基模损耗与嵌套管外径的关系

Fig. 6 Relationship between core fundamental mode loss and outer diameter of embedded casing

通过优化获得了  $3 \mu\text{m}$  波段激光传输光纤的最优结构参数,即  $t=0.75 \mu\text{m}$ ,  $D=120 \mu\text{m}$ ,  $d=67.2 \mu\text{m}$ ,  $d_2=31 \mu\text{m}$ 。HC-NANF 和 HC-ARF 的损耗曲线以及 F300 型二氧化硅的吸收曲线<sup>[19]</sup>如图 7 所示。从图 7 可以看到,对于 HC-ARF,  $3 \mu\text{m}$  波段处的光纤损耗为  $1.38 \text{ dB/km}$ ,在大于  $3 \mu\text{m}$  波段的光谱区域,光纤损耗的变化趋势与材料吸收曲线一致,说明光纤的材料损耗成为总损耗的主导因素之一;对于 HC-NANF,  $3 \mu\text{m}$  波段处的光纤损耗为  $0.52 \text{ dB/km}$ ,相比于 HC-ARF 降低了约为  $4.24 \text{ dB}$ ,在大于  $2.25 \mu\text{m}$  波段的光谱区域,光纤的材料损耗成为总损耗的主导因素之一,但其光纤总损耗在  $1.6 \sim 4.0 \mu\text{m}$  波段都比 HC-ARF 低;在约为  $2.05 \mu\text{m}$  波段处,HC-NANF 的损耗比 HC-ARF 降低了约为  $22.87 \text{ dB}$ ,说明 HC-NANF 能够明显降低光纤的传输损耗。

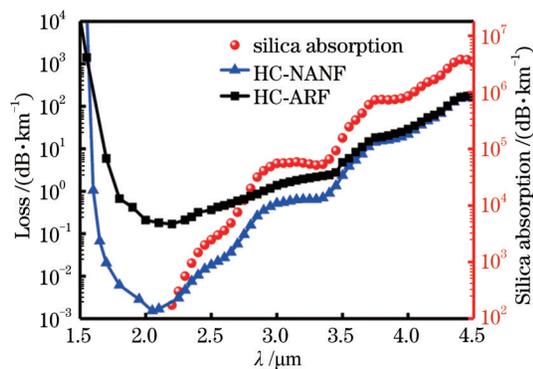


图 7 两种光纤的损耗曲线以及 F300 型二氧化硅的吸收曲线  
Fig. 7 Loss curves of two kinds of optical fibers and absorption curve of F300 type silica

## 3 特性研究

### 3.1 弯曲特性

在负曲率光纤中,除了结构变形以外,芯模和管模之间的模式耦合也会导致芯模损耗的增加。已有研究表明,通过添加嵌套管或减小包层毛细管的直径可以降低光纤的弯曲损耗<sup>[10, 12]</sup>。在弯曲的负曲率光纤中,光纤的弯曲破坏了光纤几何结构的对称性,则纤芯基模变为非简并模,两个非简并模可以在相同的弯曲半径处与管模发生模式耦合,因此在计算光纤弯曲损耗的过程中必须考虑模式的偏振。采用弯曲保角变换技术<sup>[26]</sup>来研究 HC-ARF 和 HC-NANF 的偏振方向平行或垂直于弯曲方向的两种基模的弯曲损耗。

两种偏振纤芯模式的有效折射率实部与弯曲半径的关系如图 8(a)和图 8(b)所示,对应的弯曲损耗如图 8(c)和图 8(d)所示,其中 HOM 为最低损耗的高阶模。从图 8 可以看到,两种偏振纤芯模式的有效折射率差非常小,而图 8(a)在弯曲半径分别为  $10 \text{ cm}$  和  $19 \text{ cm}$  处出现两个避免交叉的现象,这对应图 8(c)的两个高损耗峰,相应的模场分布如图 9 所示,箭头表示横向电场的方向。从图 9 可以看到,光纤平行偏振的弯曲损耗大于光纤垂直偏振,原因在于平行偏振模式的芯模和管模的偏振方向与光纤弯曲方向相同,为此耦合能力更强;当弯曲半径为  $19 \text{ cm}$  时,沿弯曲方向的芯模与管模因两者的有效折射率相近而发生耦合,导致损耗峰的出现<sup>[10]</sup>;当弯曲半径为  $10 \text{ cm}$  时,在弯曲方向的  $360^\circ/7$  处,芯模与管模出现有效折射率匹配的现象,因此出现损耗峰。当弯曲半径为  $15 \text{ cm}$  时 HC-ARF 的平行偏振模式和垂直偏振模式,以及当弯曲半径为  $10 \text{ cm}$  时

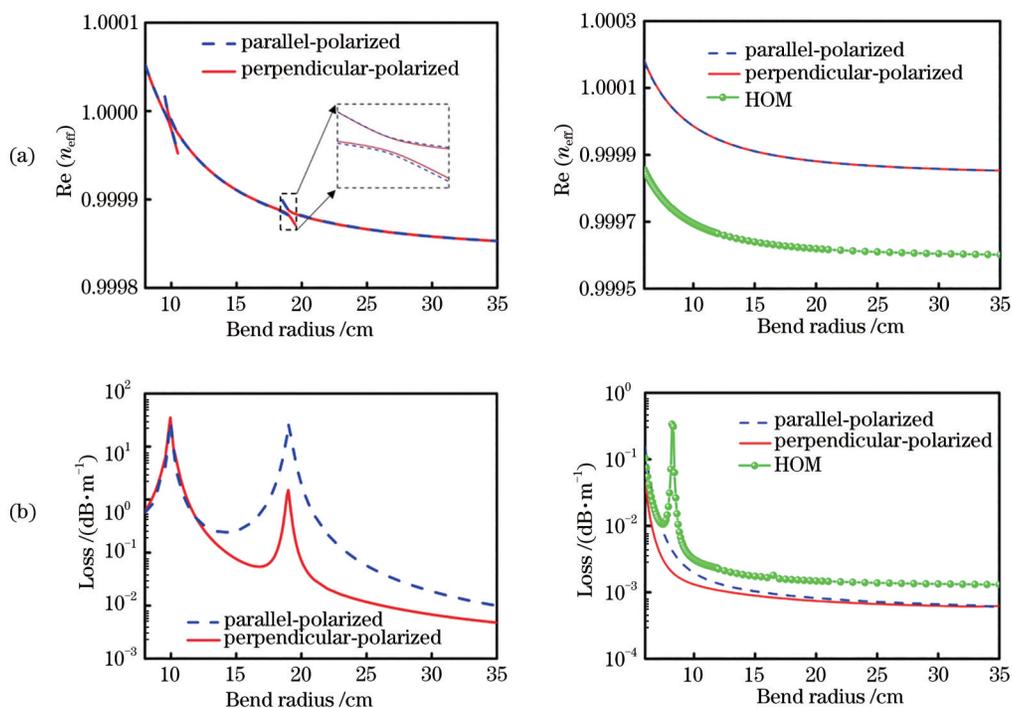


图 8 纤芯基模两种偏振状态和最低损耗高阶模的性能曲线。(a)有效折射率的实部与弯曲半径的关系;(b)弯曲损耗  
Fig. 8 Performance curves of two polarization states of core fundamental mode and lowest loss higher order mode.  
(a) Relationship between real part of ffective refractive index and bending radius; (b) bending loss

HC-NANF 的平行偏振模式和垂直偏振模式如图 10 所示。结合图 9 和图 10 可以看到,当弯曲半径减小时,HC-ARF 中的芯模和包层管模很容易发生模式耦合,而 HC-NANF 可以阻止这种现象的出现,原因在于其在 HC-ARF 的基础上添加了嵌套管,则芯模与包层模之间存在一个类月牙型区域,使得芯

模与包层管模不易发生耦合,从而达到良好的抗弯曲性能。在 HC-NANF 的基模弯曲损耗中引入高阶模弯曲的最低损耗(图 8(b)和图 8(d)的点实线),可以发现当弯曲半径为 8.2 cm 时,高阶模的最低损耗与基模的最高损耗比达到了 19 dB,因此适当地弯曲 HC-NANF 能够带来很好的单模纯度。

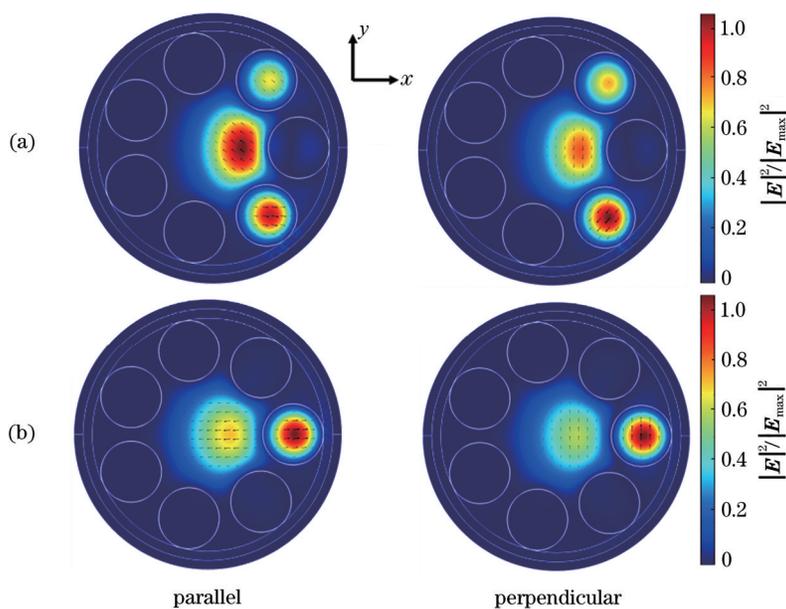


图 9 不同弯曲半径的电场分布。(a) 10 cm;(b) 19 cm  
Fig. 9 Electric field distribution at different bending radii. (a) 10 cm; (b) 19 cm

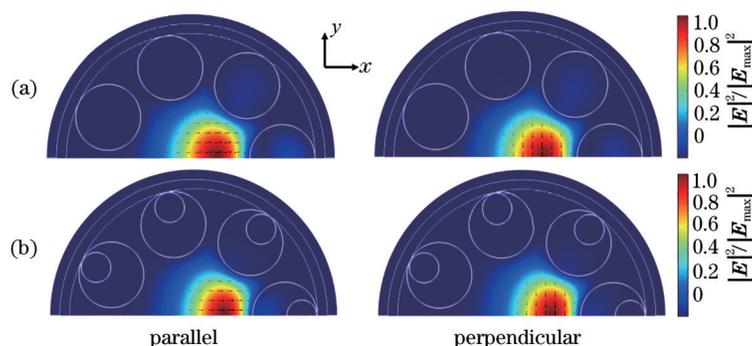


图 10 HC-ARF 和 HC-NANF 在不同弯曲半径下的电场分布。(a) 15 cm; (b) 10 cm

Fig. 10 Electric field distribution of HC-ARF and HC-NANF at different bending radii. (a) 15 cm; (b) 10 cm

### 3.2 泄漏损耗特性

当材料的吸收率等于零时,总损耗即为泄漏损耗,定义总损耗与泄漏损耗之差为材料损耗  $\alpha_m$ , 表达式为

$$\eta = \frac{\alpha_m}{\alpha_{\text{abs}}} = \frac{\alpha_{\text{total}} - \alpha_L}{\alpha_{\text{abs}}}, \quad (4)$$

式中:  $\alpha_{\text{abs}}$  为材料吸收损耗;  $\alpha_L$  为泄漏损耗;  $\alpha_{\text{total}}$  为总光纤损耗。当 ARF 的纤芯直径分别为 100, 120,

150  $\mu\text{m}$  和 NANF 的纤芯直径为 120  $\mu\text{m}$  时,总损耗与材料吸收的关系如图 11 所示。从图 11 可以看到,随着材料吸收的增加,不同光纤结构下的总损耗呈线性增加,将斜率定义为模式重叠因子  $\eta$ <sup>[11]</sup>。由此可得,当  $D=120 \mu\text{m}$  时,HC-NANF 的泄漏损耗比  $D$  值分别为 120  $\mu\text{m}$  和 150  $\mu\text{m}$  的 HC-ARF 低,说明 HC-NANF 对纤芯光的限制作用更强,对进一步降低光纤的传输损耗发挥着重要的作用。

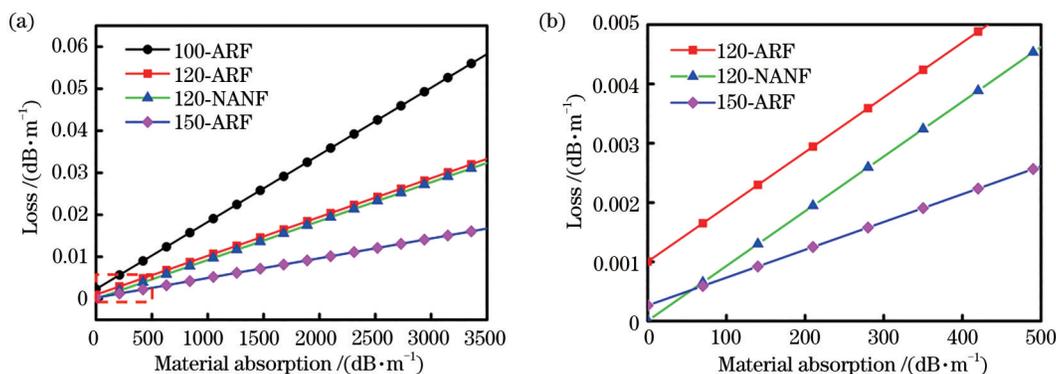


图 11 不同纤芯直径的两种光纤总损耗与材料吸收的关系。(a)宽范围图;(b)图(a)虚线框的放大图

Fig. 11 Relationship between total loss and material absorption of two kinds of fibers with different core diameters. (a) Wide range diagram; (b) enlarged view of dashed box of Fig. (a)

## 4 结 论

本文采用有限元法研究一种用于中红外激光传输的 HC-NANF。相比于 HC-ARF,在 3  $\mu\text{m}$  波段处的基模损耗降低约为 4.24 dB,HC-NANF 的基模损耗为 0.52 dB/km,最高损耗比可达 22.87 dB。光纤具有良好的抗弯曲性能,在弯曲半径低至 6.5 cm 处能够保持小于 0.1 dB/m 的基模损耗,当弯曲半径为 8.2 cm 时,高阶模的最低损耗与基模的最高损耗比达到了 19 dB,因此适当地弯曲 HC-NANF 能够带来很好的单模纯度。HC-NANF 结合了 HC-PBGF (Photonic Band Gap Fibers) 和 HC-ARF 的优点,具

有低损耗、抗弯曲、宽带宽及低模式重叠因子等优异特点,除了用于激光传输外还可作为光与物质相互作用的平台,在光谱学、通信、传感、生物医疗和军事等领域具有潜在的应用价值。

### 参 考 文 献

- [1] Guo B, Xiao Q L, Wang S H, et al. 2D layered materials: synthesis, nonlinear optical properties, and device applications[J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(12): 1800327.
- [2] Pryamikov A D, Biriukov A S, Kosolapov A F, et al. Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow-

- core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region  $> 3.5 \mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1441-1448.
- [3] Chen X, Hu X W, Li J Y. Influence factors of confinement loss of negative curvature hollow core fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 050602.  
陈翔, 胡雄伟, 李进延. 负曲率空芯光纤限制损耗的影响因素[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 050602.
- [4] Cui Y L, Zhou Z Y, Huang W, et al. Anti-resonant hollow-core fibers based  $4.3 \mu\text{m}$  carbon dioxide lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1214002.  
崔宇龙, 周智越, 黄威, 等. 基于反共振空芯光纤的  $4.3 \mu\text{m}$  二氧化碳激光器[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1214002.
- [5] Chen Y B, Wang Z F, Gu B, et al.  $1.5 \mu\text{m}$  fiber ethane gas Raman laser amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0514002.  
陈育斌, 王泽锋, 顾博, 等.  $1.5 \mu\text{m}$  光纤乙烷气体拉曼激光放大器[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0514002.
- [6] Huang W, Li Z X, Cui Y L, et al. Experimental research on stimulated Raman scattering of deuterium gas in anti-resonance hollow-core fibers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0101001.  
黄威, 李智贤, 崔宇龙, 等. 反共振空芯光纤中氘气受激拉曼散射实验研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0101001.
- [7] Gao S F, Wang Y Y, Liu X L, et al. Nodeless hollow-core fiber for the visible spectral range[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 61-64.
- [8] 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.
- [9] Jasion G T, Bradley T D, Harrington K, et al. Hollow core NANF with 0.28 dB/km attenuation in the C and L bands[C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 19629480.
- [10] Belardi W, Knight J C. Hollow antiresonant fibers with low bending loss[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 10091-10096.
- [11] Yu F, Song P, Wu D K, et al. Attenuation limit of silica-based hollow-core fiber at mid-IR wavelengths [J]. *APL Photonics*, 2019, 4(8): 080803.
- [12] Poletti F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 23807-23828.
- [13] Yu F, Knight J C. Spectral attenuation limits of silica hollow core negative curvature fiber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21466-21471.
- [14] Yu F, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss silica hollow core fibers for 3-4  $\mu\text{m}$  spectral region[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11153-11158.
- [15] Hassan M R A, Yu F, Wadsworth W J, et al. Cavity-based mid-IR fiber gas laser pumped by a diode laser[J]. *Optica*, 2016, 3(3): 218-221.
- [16] Pollnau M, Jackson S D. Advances in mid-infrared fiber lasers[M]//Ebrahim-Zadeh M, Sorokina I T. Mid-infrared coherent sources and applications. Dordrecht: Springer, 2008: 315-346.
- [17] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, et al. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [18] Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(10): 1205-1209.
- [19] Heraeus. Transmission calculator for optical applications [EB/OL]. [2020-12-22]. [https://www.heraeus.com/en/hca/fused\\_silica\\_quartz\\_knowledge\\_base\\_1/t\\_calc\\_1/transmission\\_calc\\_opt/transmission\\_calculator\\_opt.html?chartIndex=0&.selection=reflection\\_losses%2Csuprasil\\_311\\_312%2Csuprasil\\_3001\\_3002\\_300%2Csuprasil\\_1\\_2a%2Csuprasil\\_313%2Csuprasil\\_3301\\_3302%2Csuprasil\\_2b%2Csuprasil\\_cg%2Cinfrasil\\_301\\_302%2Cspectrosil\\_2000%2Choq\\_310&.thickness=10&.rangeX=120%2C4500](https://www.heraeus.com/en/hca/fused_silica_quartz_knowledge_base_1/t_calc_1/transmission_calc_opt/transmission_calculator_opt.html?chartIndex=0&.selection=reflection_losses%2Csuprasil_311_312%2Csuprasil_3001_3002_300%2Csuprasil_1_2a%2Csuprasil_313%2Csuprasil_3301_3302%2Csuprasil_2b%2Csuprasil_cg%2Cinfrasil_301_302%2Cspectrosil_2000%2Choq_310&.thickness=10&.rangeX=120%2C4500).
- [20] Michieletto M, Lyngsø J K, Jakobsen C, et al. Hollow-core fibers for high power pulse delivery[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7103-7119.
- [21] Wei C L, Joseph W R, Menyuk C R, et al. Negative curvature fibers: publisher's note[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2017, 9(3): 562.
- [22] Wu D, Yu F, Liao M. Understanding the material loss of anti-resonant hollow-core fibers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11840-11851.
- [23] Bird D. Attenuation of model hollow-core, anti-resonant fibres[J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 23215-23237.
- [24] Couny F, Benabid F, Roberts P J, et al. Generation and photonic guidance of multi-octave optical-frequency combs[J]. *Science*, 2007, 318(5853): 1118-1121.
- [25] Benabid F, Roberts P J. Linear and nonlinear optical properties of hollow core photonic crystal fiber[J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(2): 87-124.
- [26] Heiblum M, Harris J. Analysis of curved optical waveguides by conformal transformation[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1975, 11(2): 75-83.