

## 激光与光电子学进展

空芯反谐振光纤 2.60~4.35  $\mu\text{m}$  中红外激光传输及损耗表征朱宽<sup>1,2,3</sup>, 张鑫<sup>1,2,3</sup>, 鲁文学<sup>1,2,3</sup>, 王菲菲<sup>4</sup>, 张百涛<sup>4</sup>, 何京良<sup>4</sup>, 汪滢莹<sup>2,5</sup>, 王璞<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>北京市激光应用技术工程技术研究中心, 北京 100124;<sup>2</sup>北京工业大学跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室, 北京 100124;<sup>3</sup>北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124;<sup>4</sup>山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100;<sup>5</sup>暨南大学光子技术研究院, 广东 暨南 510632

**摘要** 为了研究空芯反谐振光纤的中红外激光传输能力,使用自制的无节点空芯反谐振光纤进行了 2.60~4.35  $\mu\text{m}$  的中红外激光传输实验。该空芯反谐振光纤包层由七根平均壁厚为 800 nm 的玻璃毛细管组成,光纤外径为 365  $\mu\text{m}$ ,纤芯直径为 115  $\mu\text{m}$ 。使用中红外可调谐光参量振荡器作为光源,测试了光纤在 2.60, 3.27, 3.41, 3.80, 4.08, 4.21, 4.35  $\mu\text{m}$  七个波段的激光传输及损耗特性。结果显示,该光纤可实现 2.6~4.08  $\mu\text{m}$  波段低损耗导光,在 3.27  $\mu\text{m}$  传输损耗最低,为 0.037 dB/m。光纤在 4.08  $\mu\text{m}$  和 4.35  $\mu\text{m}$  处的传输损耗分别为 3.200 dB/m 和 0.788 dB/m,而该波段熔融石英吸收损耗分别高达 1000 dB/m 和 3000 dB/m。研究结果证明,空芯反谐振光纤在中红外激光柔性传输领域拥有巨大潜力。

**关键词** 光纤光学; 空芯反谐振光纤; 中红外激光; 激光传输

中图分类号 TN214

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0306004

Propagation and Attenuation Characterization of Hollow-Core Anti-Resonant Fiber at 2.60-4.35  $\mu\text{m}$ Zhu Kuan<sup>1,2,3</sup>, Zhang Xin<sup>1,2,3</sup>, Lu Wenju<sup>1,2,3</sup>, Wang Feifei<sup>4</sup>, Zhang Baitao<sup>4</sup>, He Jingliang<sup>4</sup>, Wang Yingying<sup>2,5</sup>, Wang Pu<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>Beijing Engineering Research Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Trans-Scale Laser Manufacturing Technology, Beijing University of Technology, Ministry of Education, Beijing 100124, China;<sup>3</sup>Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;<sup>4</sup>State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China;<sup>5</sup>Institute of Photonics Technology, Jinan University, Jinan, Guangzhou 510632, China

**Abstract** To study the transmission ability of hollow-core anti-resonance fiber, a mid-infrared laser transmission experiment was carried out using a self-made nodeless hollow-core anti-resonance fiber from 2.6  $\mu\text{m}$  to 4.35  $\mu\text{m}$  spectral region. The fiber cladding consists of seven silica capillary tubes, the average wall thickness is 800 nm, the outer diameter of the fiber is 365  $\mu\text{m}$ , and the core diameter is 115  $\mu\text{m}$ . A tunable mid-infrared source was used as a

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-04-25; 录用日期: 2021-05-08

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405200)、国家自然科学基金重点项目(62035002)

通信作者: \*wangpuemail@bjut.edu.cn

broadband light source. The laser propagation capability of the fiber at 2.60  $\mu\text{m}$ , 3.27  $\mu\text{m}$ , 3.41  $\mu\text{m}$ , 3.80  $\mu\text{m}$ , 4.08  $\mu\text{m}$ , 4.21  $\mu\text{m}$ , and 4.35  $\mu\text{m}$  was tested. And the transmission loss at this spectral region of the fiber was measured. Results show that the fiber can realize low-loss light guide from 2.6  $\mu\text{m}$  to 4.08  $\mu\text{m}$  band, with the lowest transmission loss of 0.037 dB/m at 3.27  $\mu\text{m}$ . The transmission loss of the fiber is 3.200 dB/m at 4.08  $\mu\text{m}$  and 0.788 dB/m at 4.35  $\mu\text{m}$ , where the attenuation of bulk silica is 1000 dB/m and 3000 dB/m, respectively. Hollow-core anti-resonance fiber has great potential in the application of mid-infrared laser flexible delivery.

**Key words** fiber optics; hollow-core anti-resonant fiber; mid-infrared laser; laser transmission

## 1 引言

中红外 2~5  $\mu\text{m}$  波段被称为“分子指纹”区<sup>[1]</sup>, 其内包含了许多分子的吸收峰, 在光谱学、生物学、红外对抗等<sup>[1-3]</sup>诸多领域都有着极其重要的应用。随着新一代中红外激光光源的出现<sup>[4-5]</sup>, 人们对这一光谱窗口越来越感兴趣。因此, 研究可在该波段实现柔性导光的光纤是非常有意义的。

石英光纤具有传输损耗小、化学稳定性好、机械强度高、弯曲性能好等优点, 在近红外波段的应用已经取得了巨大成功, 但在中红外波段, 尤其是波长大于 3  $\mu\text{m}$  时, 石英材料有很强的材料吸收, 这限制了其在该波段的应用。最早的中红外光纤的研究开始于 20 世纪 60 年代, 最初是由  $\text{As}_2\text{S}_3$  玻璃制作而成, 损耗在 10 dB/m 以上<sup>[6]</sup>。为满足传输需要, 1975 年以来发展了一系列中红外光纤, 包括重金属氟化物玻璃 (HMFG) 光纤、多晶红外光纤 (PIR) 和空芯光纤 (HCF)<sup>[7]</sup>。然而这些光纤的机械性能和光学性能还是无法和近红外波段的石英光纤相比。比如, 目前应用广泛的硫族化合物和氟化物玻璃光纤, 虽然损耗已经达到较低的水平, 但其材料具有化学稳定性较差、遇水易潮解、激光损伤阈值低等缺点。20 世纪 90 年代根据微波波导的思路, 发展出了一种矩形铝片制作的空芯红外波导, 可以将 10.6  $\mu\text{m}$  处损耗降低至 1 dB/m<sup>[8]</sup>。沿着这种思路, 研究者们制作出了各种红外空芯波导, 如金属、塑料和玻璃材料。

1999 年空芯光子晶体光纤 (HC-PCF) 诞生<sup>[9]</sup>, 这种独特的空气导石英基光纤一经问世, 便受到了众多领域研究者们的关注。类似于早期的空芯波导, 其绝大部分光 (>98%) 被束缚在空气纤芯中传输, 光在传输过程中光场与石英的重叠很小, 使得在石英材料上实现中红外激光的低损耗传输成为可能。自第一根 HC-PCF 诞生以来, 空芯光纤的发展日新月异, 低损耗纪录被不断打破, 导光波段也涵盖了从紫外<sup>[10]</sup>到中红外波段, 其高功率激光传输能力也逐渐被验证<sup>[11]</sup>。但目前为止, 空芯光纤在

中红外波段, 尤其是对 4  $\mu\text{m}$  以上波段的高功率激光传输性能研究较少。2005 年, 英国巴斯大学首次报道了可以传输 3  $\mu\text{m}$  以上波段的 HC-PCF<sup>[12]</sup>。在中红外高功率激光传输方面, 国际上已经报道了使用空芯负曲率光纤进行 2.94  $\mu\text{m}$  高能激光传输, 并进行了生物组织消融的演示<sup>[13]</sup>。2018 年, 本课题组报道了一款 1.55~3.35  $\mu\text{m}$  低损耗传输的无节点空芯反谐振光纤 (HC-ARF), 在 2.45  $\mu\text{m}$  波段最低损耗 0.05 dB/m, 并利用近红外 1  $\mu\text{m}$  皮秒超快激光, 泵浦充有甲烷气体的空芯光纤, 得到 2.8  $\mu\text{m}$  高峰值功率拉曼激光输出<sup>[14]</sup>。2020 年 10 月本课题组设计并成功拉制了多款中红外导光的空芯反谐振光纤, 并对其进行了一系列性能表征。

光参量振荡器 (OPO) 是目前获得 2~5  $\mu\text{m}$  激光输出最常用的技术手段, 可输出功率较高的中红外激光, 并且波长可以随温度和晶体周期而调谐, 是进行中红外光纤传输测试的理想光源<sup>[15]</sup>。本文使用纳秒光纤激光器泵浦的周期铌酸锂晶体 (MgO:PPLN) 光参量振荡器作为测试光源, 对自制的 HC-ARF 进行了中红外激光传输实验, 测试并分析了光纤的中红外导光能力及传输损耗。测试证明了该光纤可实现 2.6~4.35  $\mu\text{m}$  中红外激光传输, 为中红外气体传感、气体激光器、中红外光谱学等应用, 提供了优秀的光与物质相互作用的平台。

## 2 中红外 HC-ARF 传输实验

为了分析 HC-ARF 传输中红外波段传输激光的能力, 使用自制的一款 HC-ARF 进行了中红外激光传输实验, 并测量了其传输损耗。光纤截面结构如图 1 所示, 光纤纤芯直径为 115  $\mu\text{m}$ , 包层由七根平均壁厚 800 nm 的毛细管组成, 测试使用的光纤长度为 50 m。使用中红外可调谐光参量振荡器作为测试光源。该光源使用 1064 nm 光纤激光器作为泵浦源, 泵浦掺杂摩尔分数为 5% 氧化镁的周期极化铌酸锂晶体, 泵浦源重复频率为 50 kHz, 脉宽为 192 ns。通过改变晶体周期和调谐晶体温度可以实现

2.5~4.4 μm 波段激光输出,输出功率可到数瓦。综合考虑光源和光纤的特性,选取了 2.6 μm、3.27 μm、3.41 μm、3.8 μm、4.08 μm、4.21 μm 和 4.35

μm 七个波段分别进行了激光传输和损耗测试。使用索雷博公司 OSA205C 单色仪测量了光源发射激光的光谱,如图 2 所示。

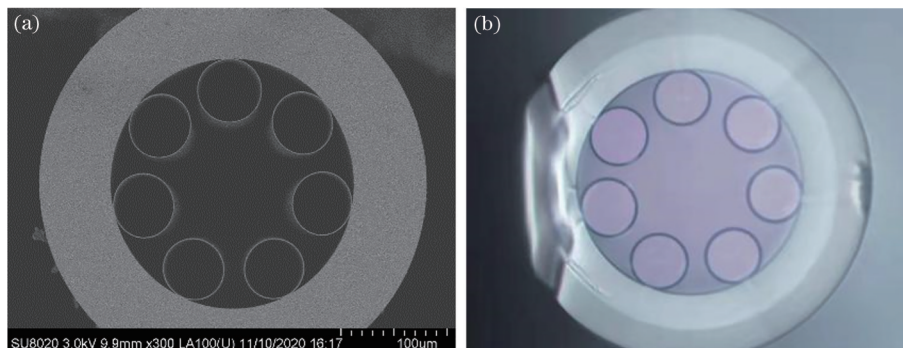


图 1 HC-ARF 光纤截面图。(a)电子扫描显微镜图片;(b)光学显微镜图片

Fig. 1 Cross section of HC-ARF. (a) Scanning electron microscope image; (b) optical microscope image

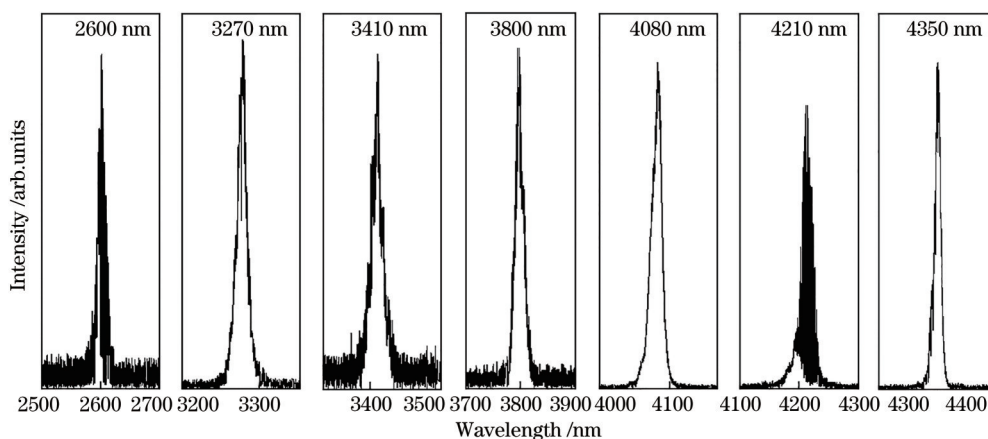


图 2 中红外 OPO 输出光谱

Fig. 2 Mid-infrared OPO output spectra

为了验证 HC-ARF 的中红外激光传输能力,使用上述 HC-ARF 进行了中红外激光传输实验,并同时测试了光纤的传输损耗。实验装置如图 3 所示。OPO 光源发射的激光通过锗片滤波后输出中红外激光 ( $M^2 > 2$ )。由于 OPO 光源在调谐波长时需要更换晶体并调节腔镜角度,这将导致空间耦合条件的改变,而在使用截断法测试光纤传输损耗时,需要保证光纤在截断前后光源功率稳定。实验过程

中通过衔接一根过渡光纤的方法构造了一个稳定的激光输出。其前提是,光纤空间对接的重复性是可靠的。本课题组前期通过实验验证了这个假设,通过重复对接实验,证明光纤空间对接引入的误差小于 3%。通过焦距为 75 mm 的  $\text{CaF}_2$  平凸透镜,将光束耦合进长度为 40 cm 的过渡光纤纤芯,构造一个类似光纤输出的光源。为了滤除过渡光纤中的包层光,本文对过渡光纤施加较强的弯曲,以保证

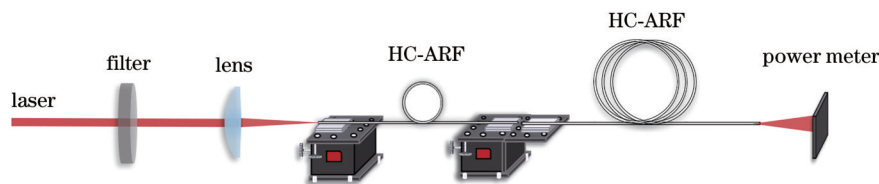


图 3 中红外激光 HC-ARF 传输及损耗测试光路装置

Fig. 3 Test setup of mid-infrared laser HC-ARF transmission and loss test



激光是在光纤纤芯中传输的。过渡光纤输出端和待测光纤通过三维位移台进行空间对接。待测光纤长度为 50 m, 为避免引入光纤弯曲损耗, 光纤被盘绕成直径 70 cm 的松散圆环, 光纤输出的激光由灵敏度较高的热敏功率计测量。

通过调谐 OPO 输出激光的波长, 测试了 2.60, 3.27, 3.41, 3.80, 4.08, 4.21, 4.35  $\mu\text{m}$  七个波段的激光传输结果。实验结果表明, HC-ARF 长度为 50 m 时可传输 2.60, 3.27, 3.41, 3.80, 4.08  $\mu\text{m}$  的中红外激光, 由于光源功率较低且光纤较长, 实验传输激光功率较低, 激光传输 50 m 后输出功率分别为 3, 30, 65, 20, 25 mW。

4.21  $\mu\text{m}$  和 4.35  $\mu\text{m}$  波段由于光纤损耗较高, 使用 3 m 长的光纤进行激光传输实验。传输后激光功率分别为 4 mW 和 8 mW。而对于 40 cm 长的过渡光纤来说, 上述所有波段的中红外激光均实现了更高功率的传输, 传输功率在 0.2~2 W 之间。由

于光源的波长限制, 没有得到比 4.35  $\mu\text{m}$  更长波段的传输结果。虽然由于光源功率限制, HC-ARF 传输激光的功率较低, 但该传输结果已经可以证明 HC-ARF 的中红外激光传输能力。

### 3 中红外 HC-ARF 损耗测试

利用上述实验装置, 通过截断法计算截断光纤前后输出功率变化, 得到了光纤在 2.60, 3.27, 3.41, 3.80, 4.08, 4.21, 4.35  $\mu\text{m}$  七个波段的传输损耗。损耗结果纪录在表 1 中。在 2.60, 3.27, 3.41, 3.80, 4.08  $\mu\text{m}$  波段, 光纤截断前后长度分别为 50 m 和 5 m。4.2  $\mu\text{m}$  和 4.35  $\mu\text{m}$  波段损耗较高, 分别使用 3 m 和 5 m 长的光纤进行截断法测量。以上所有测试结果都来自同一根 50 m 长的光纤。该测试结果可以证明, HC-ARF 可实现 2.6~4.35  $\mu\text{m}$  波段激光传输。测试结果显示, 在 3.27  $\mu\text{m}$  波段光纤损耗最低, 仅为 0.037 dB/m。

表 1 HC-ARF 中红外传输损耗

Table 1 HC-ARF mid-infrared transmission loss

Wavelength / $\mu\text{m}$	2.60	3.27	3.41	3.80	4.08	4.21	4.35
Loss / (dB·m <sup>-1</sup> )	0.310	0.038	0.037	0.089	0.081	3.200	0.788

基于表 1 中的数据, 制作了 HC-ARF 的损耗谱, 如图 4 所示。图 4 中插图表示石英吸收损耗曲线, 数据来自 HC-ARF 制造材料提供商 Heraeus 公司。石英的吸收损耗在中红外波段呈灾难性的指数级上升, 在 4.4  $\mu\text{m}$  波段达到了 4000 dB/m。利用商用有限元分析仿真软件 Comsol 对 HC-ARF 结构进行仿真计算, 结果显示该 HC-ARF 的光场与石英重叠为

$5 \times 10^{-5}$ , 较低的石英重叠度极大地减小了石英引入的吸收损耗。在 3.27  $\mu\text{m}$  波段, 石英吸收损耗高达 80 dB/m, 而通过反谐振导光原理可将传输损耗降低至 0.037 dB/m。在 4.35  $\mu\text{m}$  波段, 光纤损耗为 0.788 dB/m, 而该波段石英吸收损耗约 3000 dB/m, 即使 HC-ARF 的石英与光场重叠度很低, 仍然引入了 0.15 dB/m 以上的吸收损耗, 此时石英吸收损耗成为进一步降低光纤损耗的主要限制因素。实验结果证明, 通过反谐振结构设计的空芯光纤, 可以将石英光纤损耗降低为原来的 1/3000, HC-ARF 在中红外波段激光传输领域展现出巨大潜力。

### 4 纤芯中的气体分子共振吸收

中红外波段包含很多分子的特征吸收峰, 例如 H<sub>2</sub>O、HCl 及 CO<sub>2</sub> 气体的吸收峰分别在 2.5~2.8  $\mu\text{m}$ 、3.2~3.8  $\mu\text{m}$  和 4.1~4.3  $\mu\text{m}$ , 因此该波段激光可以应用到环境监测, 有毒气体监测、油田天然气管道泄漏监测等领域<sup>[16-17]</sup>。对于所有的空芯光纤来说, 虽然在拉制时光纤被充入氮气以保证内部结构的均匀性, 但在光纤保存和使用时, 纤芯中难以避免地会进入空气。空气中的 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 分子会为激光在纤芯中传输引入额外的吸收损耗。实

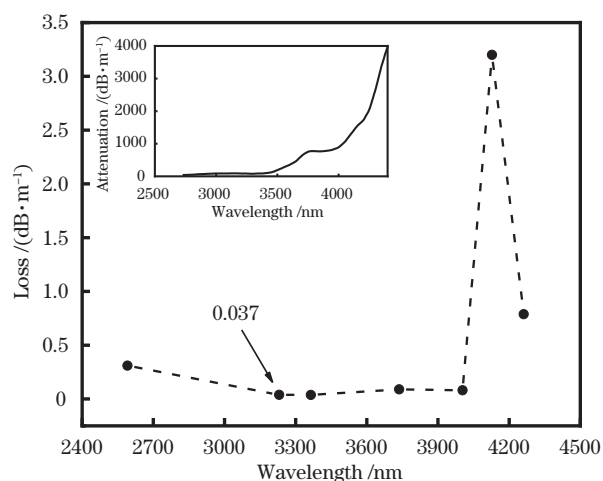


图 4 HC-ARF 传输损耗 (插图: 石英材料损耗谱)

Fig. 4 HC-ARF transmission loss (inset: loss spectrum of silica material)

实验测得 2.6  $\mu\text{m}$  波段光纤损耗为 0.31 dB/m, 远高于 3.27  $\mu\text{m}$  波段和 3.41  $\mu\text{m}$  波段的损耗。推测这是由于羟基(OH)在该波段的吸收引起的。 $\text{H}_2\text{O}$  分子中存在羟基振动, 其振动能量对应于 2.5~2.8  $\mu\text{m}$  附近的光子能量, 因此  $\text{H}_2\text{O}$  分子在该波段存在着较强的红外吸收。其吸收强度随着  $\text{H}_2\text{O}$  分子间或  $\text{H}_2\text{O}$  分子与其他分子间结合形成的氢键能量而变化, 不同的结合方式对应不同位置的红外吸收峰。图 5(a) 为在室温 1 个标准大气压下,  $\text{H}_2\text{O}$  体积分数为 0.03% 时得到  $\text{H}_2\text{O}$  分子在中红外波段的吸收系数谱线, 数据来自 HITRAN 数据库<sup>[18]</sup>。HC-ARF 中的羟基存在于空气纤芯和光纤包层石英壁中, 从而使光纤呈现一段较强的吸收带, 增大了光纤损耗<sup>[19-20]</sup>。其中光纤包层石英壁中的羟基是拉制光纤的石英管材料中含有的, 在拉制过程中部分羟基会受热而析出。因此很难确定光纤中的  $\text{H}_2\text{O}$  分子引起的吸收损耗的具体大小。

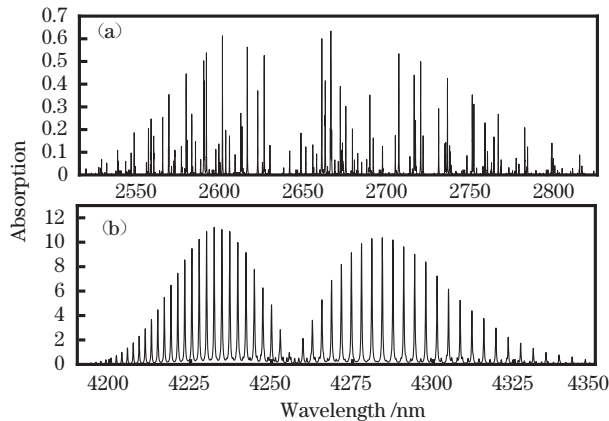


图 5 分子的红外吸收光谱。(a)  $\text{H}_2\text{O}$ ; (b)  $\text{CO}_2$

Fig. 5 Infrared absorption spectra of molecules. (a)  $\text{H}_2\text{O}$ ; (b)  $\text{CO}_2$

实验测得 4.21  $\mu\text{m}$  波段损耗为 3.2 dB/m, 比 4.08  $\mu\text{m}$  波段损耗迅速增加了约 40 倍。在 4.35  $\mu\text{m}$  波段, 光纤损耗又下降为 0.788 dB/m。可以推测, 4.21  $\mu\text{m}$  波段光纤损耗增大是纤芯中  $\text{CO}_2$  分子吸收导致的。大气中  $\text{CO}_2$  体积分数约为  $4 \times 10^{-4}$ <sup>[21]</sup>, 以此绘制的  $\text{CO}_2$  分子吸收强度曲线如图 5(b) 所示。由于  $\text{CO}_2$  吸收峰为多个分立的峰, 使用 OPO 光源进行损耗测试难以得到精确的吸收损耗谱线。为了得到 4.21  $\mu\text{m}$  波段光强的总吸收, 本文对其进行积分计算。其中吸收系数的定义为

$$a_\lambda = -\ln [I(\lambda)/I_0(\lambda)], \quad (1)$$

式中:  $a_\lambda$  为不同波长处的  $\text{CO}_2$  吸收系数;  $I_0(\lambda)$  和

$I(\lambda)$  分别表示波长为  $\lambda$  的光通过 1 m 长的  $\text{CO}_2$  气室前后的光强。

$$I = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} I(\lambda) d\lambda, \quad I_0 = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} I_0(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中:  $I_0$  和  $I$  分别为实验所用的 4.21  $\mu\text{m}$  波段激光在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段内通过 1 m 长的  $\text{CO}_2$  气室前后的总光强,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的值分别为 4150 nm 和 4250 nm。

$$A_{\text{CO}_2} = -10 \lg(I/I_0), \quad (3)$$

式中:  $A_{\text{CO}_2}$  表示该波段激光传输 1 m 长的距离,  $\text{CO}_2$  分子吸收导致的总损耗, 单位是 dB/m。

计算结果表明, 该中心波长 4212 nm 带宽约为 20 nm 的激光在空芯反谐振光纤中传输时, 体积分数为  $4 \times 10^{-4}$  的  $\text{CO}_2$  引入的吸收损耗约为 2.5 dB/m。这与实验得到的 3.2 dB/m 数据相吻合, 这证明了在 4.21  $\mu\text{m}$  波段  $\text{CO}_2$  分子吸收是影响 HC-ARF 传输损耗的重要因素, 同样该结论可以推演至整个  $\text{CO}_2$  分子吸收强烈的 4.20~4.35  $\mu\text{m}$  波段。

## 5 结 论

本文使用一款无节点空芯反谐振光纤进行了中红外激光传输实验, 测试并分析了光纤在中红外波段的导光性能。使用中红外光参量振荡器作为光源进行了 HC-ARF 激光传输实验, 实验传输了 2.60~4.35  $\mu\text{m}$  多个波段的激光。实验证明了该 HC-ARF 可在 2.60~4.08  $\mu\text{m}$  波段低损耗导光, 最低损耗在 3.27  $\mu\text{m}$  处为 0.037 dB/m。证明了该光纤具有中红外波段宽光谱激光传输的能力。该中红外波段包含了许多分子的特征吸收谱线, 因此本文分析了空芯光纤纤芯中的  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  分子的吸收特性。在 2.60  $\mu\text{m}$  波段, 测试得到光纤损耗为 0.31 dB/m, 这是由于 2.50~2.80  $\mu\text{m}$  波段  $\text{H}_2\text{O}$  分子吸收导致该波段光纤损耗的增大。在 4.20~4.35  $\mu\text{m}$  波段,  $\text{CO}_2$  分子的强烈吸收导致光纤损耗的迅速升高, 实验测得 4.21  $\mu\text{m}$  和 4.35  $\mu\text{m}$  处光纤损耗分别为 3.200 dB/m 和 0.788 dB/m。

由于实验条件限制, HC-ARF 激光传输功率较低。探索 HC-ARF 的中红外高功率激光传输极限, 需要使用更高功率的中红外源。下一步可以使用更高功率的激光源, 进一步验证 HC-ARF 对中红外高功率激光的传输能力。由于 HC-ARF 为熔融石英材料, 其机械强度高、化学性能稳定, 激光损伤阈值高。空芯反谐振光纤在中红外波段激光传输领域有着巨大的应用潜力。为中红外激光柔性传输、

中红外气体激光器和中红外气体传感等领域提供了优秀的激光传输平台。

### 参 考 文 献

- [1] Tittel F K, Richter D, Fried A. Mid-infrared laser applications in spectroscopy[M]//Sorokina I T, Vodopyanov K L. Topics in applied physics. Heidelberg: Springer, 2003, 89: 458-529.
- [2] Jean B, Bende T. Mid-IR laser applications in medicine[M]//Sorokina I T, Vodopyanov K L. Topics in applied physics. Heidelberg: Springer, 2003, 89: 530-565.
- [3] Meng D D, Zhang H B, Li M S, et al. Laser technology for direct IR countermeasure system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 1105009. 孟冬冬, 张鸿博, 李明山, 等. 定向红外对抗系统中的激光器技术[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 1105009.
- [4] Zhou S, Li M Z, Jiang J, et al. Solid-state mid-infrared laser technology research progress[J]. Infrared Technology, 2019, 41(5): 391-399. 周松, 李茂忠, 姜杰, 等. 中红外固体激光技术研究进展[J]. 红外技术, 2019, 41(5): 391-399.
- [5] Hu M L, Cai Y. Research progress on mid-infrared ultrafast fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500009. 胡明列, 蔡宇. 中红外波段超快光纤激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500009.
- [6] Kapany N S, Simms R J. Recent developments in infrared fiber optics[J]. Infrared Physics, 1965, 5(2): 69-80.
- [7] Harrington J A. A review of IR transmitting, hollow waveguides[J]. Fiber and Integrated Optics, 2000, 19(3): 211-227.
- [8] Katagiri T, Matsuura Y, Miyagi M. Metal-covered photonic bandgap multilayer for infrared hollow waveguides[J]. Applied Optics, 2002, 41(36): 7603-7606.
- [9] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. Science, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [10] Wang M L, Gao S F, Wang Y Y, et al. UV guiding hollow-core antiresonant fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0806002. 王梦玲, 高寿飞, 汪滢莹, 等. 紫外空芯反谐振光纤的研制[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0806002.
- [11] Gao S F, Wang Y Y, Liu X L, et al. Hollow-core anti-resonant fiber and its use for propagation of high power ultrashort pulse[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201012. 高寿飞, 汪滢莹, 刘小璐, 等. 空芯反谐振光纤及其高功率超短脉冲传输[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201012.
- [12] Shephard J, Macpherson W, Maier R, et al. Single-mode mid-IR guidance in a hollow-core photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2005, 13(18): 7139-7144.
- [13] Urich A, Maier R R, Yu F, et al. Flexible delivery of Er:YAG radiation at 2.94  $\mu\text{m}$  with negative curvature silica glass fibers: a new solution for minimally invasive surgical procedures[J]. Biomedical Optics Express, 2013, 4(2): 193-205.
- [14] Cao L, Gao S F, Peng Z G, et al. High peak power 2.8  $\mu\text{m}$  Raman laser in a methane-filled negative-curvature fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5609-5615.
- [15] Wang F F, Nie H K, Liu J T, et al. Miniaturized widely tunable MgO: PPLN nanosecond optical parametric oscillator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501015. 王菲菲, 聂鸿坤, 刘俊亭, 等. 小型化宽调谐 MgO: PPLN 中红外纳秒光参量振荡器[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501015.
- [16] Johansen I R, Lines G T, Honne A, et al. Calibration of an FT-IR spectrometer for ambient air monitoring using PLS[J]. Applied Spectroscopy, 1997, 51(10): 1540-1546.
- [17] Li M Y, Wang F, Zhang Y Q. Measurement of nitric oxide with low concentration based on mid-infrared laser absorption spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 053002. 李玫仪, 王飞, 张雅琪. 基于中红外激光吸收光谱的低浓度一氧化氮测量[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 053002.
- [18] Rothman L S, Gordon I E, Barber R J, et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2010, 111(15): 2139-2150.
- [19] Yao C Y, Gao S F, Wang Y Y, et al. Silica hollow-core negative curvature fibers enable ultrasensitive mid-infrared absorption spectroscopy[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(7): 2067-2072.
- [20] 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.
- [21] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2020[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(4): 3269-3340.