

基于气压控制的单谱线 4.3  $\mu\text{m}$  空芯光纤 HBr 激光器周智越<sup>1,2</sup>, 崔宇龙<sup>1,2</sup>, 黄威<sup>1,2</sup>, 李昊<sup>1,2</sup>, 裴闻喜<sup>1,3</sup>, 王蒙<sup>1,2,3</sup>, 王泽锋<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;<sup>2</sup>脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;<sup>3</sup>高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 基于空芯光纤(HCF)的气体激光器是实现中红外激光输出的一种有效手段,一般情况下,跃迁选择定则决定一条泵浦吸收谱线对应两条激射跃迁谱线。通过气压控制的方法实现了单一谱线的 4.3  $\mu\text{m}$  单程结构 HCF HBr 激光器。以自研的 1958 nm 连续波高功率窄线宽掺铥光纤放大器为泵浦源,泵浦一段 5 m 长、充低压 HBr 气体的反共振 HCF,通过气压控制分别实现了同位素  $\text{H}^{79}\text{Br}$  和  $\text{H}^{81}\text{Br}$  单一谱线 4.3  $\mu\text{m}$  的激光输出,最大激光功率为 350 mW,总的光光转换效率约为 8%。利用自行搭建的光纤扫描装置测量了输出激光光斑,结果表明其是一种基模。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 分子气体激光器; 空芯光纤

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0514005

## Hollow-Core Fiber HBr Laser with 4.3 $\mu\text{m}$ Single Spectral Line Based on Gas Pressure Control

Zhou Zhiyue<sup>1,2</sup>, Cui Yulong<sup>1,2</sup>, Huang Wei<sup>1,2</sup>, Li Hao<sup>1,2</sup>, Pei Wenxi<sup>1,3</sup>,  
Wang Meng<sup>1,2,3</sup>, Wang Zefeng<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup> College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>3</sup> Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** Gas laser based on hollow-core fiber (HCF) is an effective means to realize mid-infrared laser output. Generally, according to the transition selection rule, one pump absorption line corresponds to two lasing transition lines. A single-pass HCF HBr laser with a 4.3  $\mu\text{m}$  single spectral line is realized by means of air pressure control. Using the self-developed 1958 nm continuous wave high-power narrow linewidth thulium-doped fiber amplifier as the pump source, a 5-meter-long anti-resonant HCF filled with low-pressure HBr gas is pumped. The laser output with 4.3  $\mu\text{m}$  single spectral line of isotope  $\text{H}^{79}\text{Br}$  and  $\text{H}^{81}\text{Br}$  is realized respectively through air pressure control, the maximum laser power is 350 mW, and the total optical-optical conversion efficiency is about 8%. The output laser spot is measured by the self-built optical fiber scanning device, and the result shows that it is a fundamental mode.

**Key words** lasers; fiber lasers; molecular gas lasers; hollow-core fibers

## 1 引言

中红外激光在许多领域都有重要的应用,一直

以来都是国内外研究的热点<sup>[1-2]</sup>。比如,中红外波段激光包含了大气传输窗口,能用于大气通信;众多有机和无机气体分子在中红外波段较近红外和可见光

收稿日期: 2021-08-30; 修回日期: 2021-09-15; 录用日期: 2021-09-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61705266)、湖南省自然科学基金杰出青年科学基金项目(2019JJ20023)

通信作者: \*zefengwang\_nudt@163.com

波段具有更强的吸收峰<sup>[3]</sup>,能用于各种气体分子的低浓度检测;水分子在 2,3,6.5  $\mu\text{m}$  三个中红外波段处有重要的强吸收峰<sup>[4]</sup>,在生物医疗上能作为“手术刀”来切割含有大量水分子的生物组织器官,具有创口小、止血迅速等特点。产生中红外激光的方法很多<sup>[5-9]</sup>,其中掺稀土离子的软玻璃光纤被认为是最有希望产生高效、紧凑和高功率的中红外激光的元件<sup>[1]</sup>。然而,受限于稀土种类、软玻璃光纤制备工艺水平和软玻璃光纤的化学稳定性等因素,基于掺稀土离子的软玻璃光纤的中红外激光器在波长拓展和功率提升方面存在技术瓶颈。

基于空芯光纤(HCF)的气体激光器是近年来出现的新型激光器,其结合了光纤激光器和气体激光器的优势<sup>[10]</sup>。通过设计在泵浦波段和激光波段具有低传输损耗的 HCF,并充入合适的气体增益介质,能够有效实现中红外波段的激光输出。使用乙炔气体通过本征吸收的方式实现 3  $\mu\text{m}$  波段的激光输出被大量报道<sup>[11-17]</sup>。其中,2011 年, Jones 等<sup>[11]</sup>利用一个中心波长为 1.52  $\mu\text{m}$  的光学参量振荡器脉冲泵浦源泵浦一段充有低气压乙炔气体的 Kagome HCF,分别在 P(9)谱线(3.12  $\mu\text{m}$ )和 R(7)谱线(3.16  $\mu\text{m}$ )处产生了激光辐射,但系统的斜效率只有百分之几,主要是因为 HCF 在产生激光波段有较大的传输损耗(20 dB/m)。随后, Xu 等<sup>[15]</sup>实现了瓦级单程光纤乙炔气体激光器的连续输出,在 60 Pa 气压下得到的最高连续输出功率为 1.12 W,斜率效率( $\eta$ )约为 33%,其输出功率是 P(9)和 R(7)两条输出谱线的功率之和。上述基于充有乙炔气体的 HCF 实现的 3  $\mu\text{m}$  波段中红外输出虽然都包含了 P 支和 R 支两条谱线,但是关于不同条件下输出谱线成分分析的报道较少。除了使用乙炔气体,本课题组还使用充有二氧化碳的 HCF 实现了光纤激光中 4.388  $\mu\text{m}$  的最长连续波波长输出<sup>[18-19]</sup>。在最佳气压 500 Pa 的情况下,该激光器的激光阈值约为 100 mW,最大输出功率约为 80 mW,激光斜率效率约为 9.3%。同样,中红外输出光谱中包含了两条谱线。前期本课题组将溴化氢气体充入 HCF<sup>[20]</sup>获得了 125 mW 的平均输出功率和 10%的光光转换效率,但受限于泵浦源系统波长调谐范围和最大输出功率,只能覆盖溴化氢的 H<sup>79</sup>Br 同位素,得到较低的输出功率,且只初步测量了输出光谱特性。虽然泵浦一条吸收线通常会对应两条发射谱线,但是实验发现改变气压和输入泵浦功率可以得到单一谱线的纯净光谱,具有实用价值。

本文在充有 HBr 气体的反谐振 HCF 中通过控制气压实现了单程结构的 4.3  $\mu\text{m}$  单波长中红外激光输出。泵浦源系统是自行搭建的高功率窄线宽可调谐的两级放大 2  $\mu\text{m}$  掺铥光纤放大器,最大输出泵浦功率为 8 W,使用的 HCF 长度为 5 m。当泵浦源波长分别精确调谐到 HBr 两种同位素 H<sup>79</sup>Br 和 H<sup>81</sup>Br 的一阶泛频 R(5) 吸收线(对应中心波长分别为 1957.79 nm 和 1958.08 nm)时,在 P(7) 跃迁线(波长为 4263.5 nm)处获得了最大输出功率(350 mW),相对耦合泵浦功率的转换效率为 8%。相较光纤气体激光器一般输出相对强度不确定的两条谱线,本文通过对 HBr 气压和入射泵浦功率条件的控制可以得到 4.3  $\mu\text{m}$  单波长输出的纯净中红外光谱。同时,使用自行搭建的光纤扫描装置测量了输出中红外光斑的强度分布,发现所提激光器具有良好的单模特性。

## 2 实验装置

### 2.1 高功率可调谐窄线宽的 2 $\mu\text{m}$ 光纤泵浦源

自行搭建的高功率可调谐窄线宽的 2  $\mu\text{m}$  泵浦源系统如图 1(a)所示,其中 TDF 为掺铥光纤。种子源是中心波长是 1958 nm 的可精确调谐的连续输出半导体激光器(爱尔兰 Eblana Photonics 公司生产,型号为 EP1958-0-DM-DX1-FM,线宽小于 2 MHz),最大输出功率为 3 mW。为保护种子源,在种子源后接一个光纤隔离器。光纤隔离器后接的是前向泵浦的两级放大掺铥光纤放大器。第一级是预放大级,种子源和中心波长为 793 nm 的泵浦源通过合束器与 9 m 长的单包层掺铥光纤(美国 Nufern 公司生产,型号为 SM-TSF-9/125)相连,种子光能被放大到几百毫瓦量级;第二级是主放大级,第一级输出的光和另一个中心波长为 793 nm 的泵浦源同样通过合束器与 2.5 m 长的双包层掺铥光纤(美国 Nufern 公司生产,型号为 SM-TDF-10P/130-HE)相连。HBr 有两种同位素 H<sup>79</sup>Br 和 H<sup>81</sup>Br,丰度值大致相当<sup>[21]</sup>。图 1(b)展示了同位素 H<sup>79</sup>Br 在 2  $\mu\text{m}$  波段的一阶泛频吸收谱<sup>[22]</sup>及能级跃迁过程,其中  $j, j', j''$  为对应振动态上的转动态。另一同位素 H<sup>81</sup>Br 也有类似的吸收谱,相同吸收线对应的波长有微小差异。实验中使用的泵浦波长在 1958 nm 附近,该波长是 HBr 的 R(5)吸收线对应的波长,用图 1(b)右上角插图中向上的虚线表示。当 HBr 分子被 R(5)吸收线泵浦时,会从  $v=0$  的振动基态跃迁到  $v=2$  的上能级振动态上。根据跃迁

选择定律, 激发的上能级跃迁到  $v=1$  振动态上, 分别发射出 R(5) 和 P(7) 两条激光跃迁线。然后,  $v=$

1 振动态上的粒子通过碰撞引起的振动弛豫(非辐射跃迁)跃迁回振动基态。

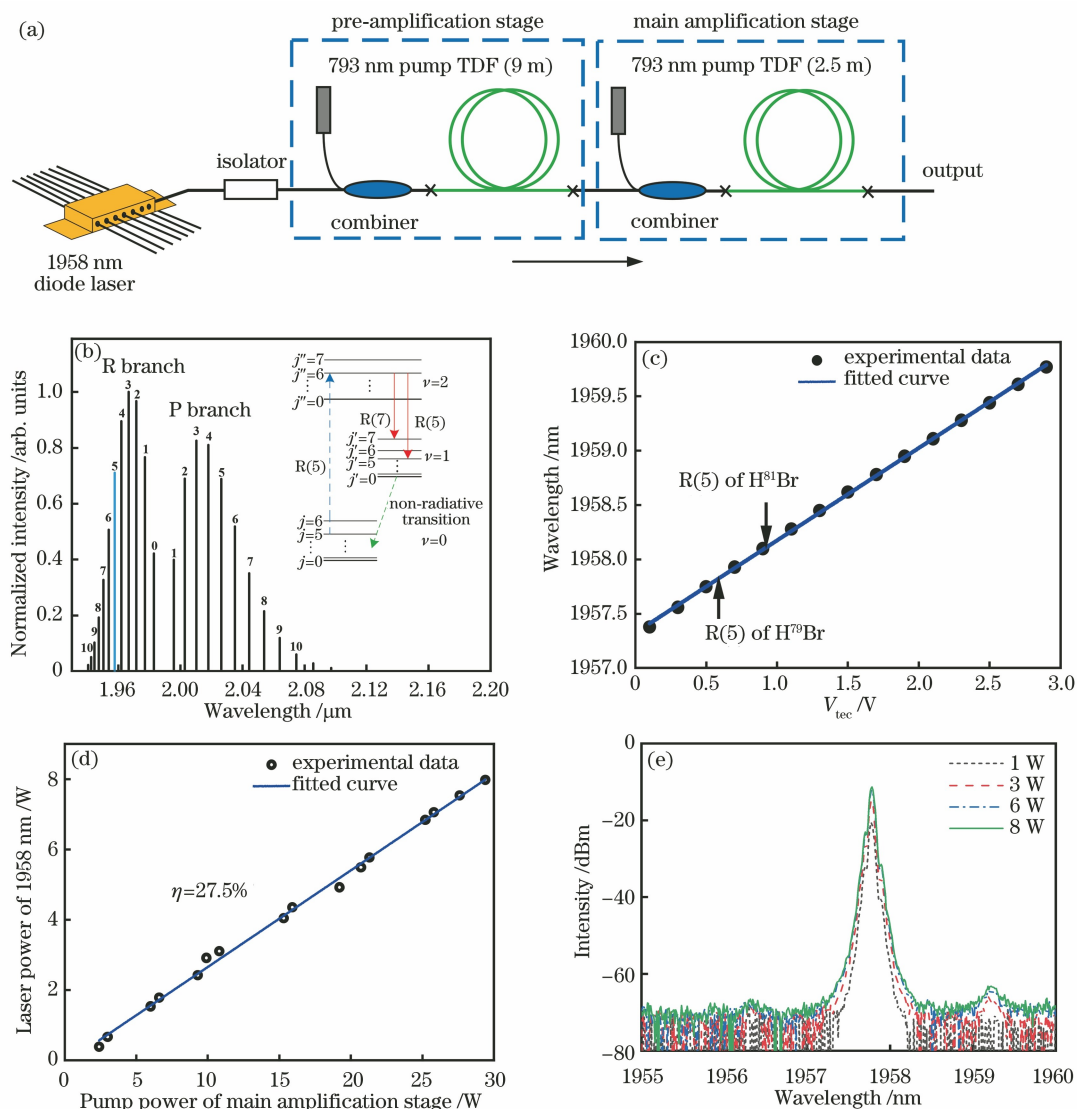


图 1 可调谐 1958 nm 泵浦源系统特性。(a) 两级放大的泵浦源系统结构; (b)  $\text{H}^{79}\text{Br}$  分子在  $2 \mu\text{m}$  波段的吸收谱及 R(5) 吸收线泵浦对应的能级跃迁过程; (c) 输出波长随  $V_{\text{tec}}$  的变化; (d) 输出 1958 nm 激光功率随主放大级泵浦功率的变化; (e) 不同输出功率下的泵浦源光谱

Fig. 1 Characteristics of tunable 1958 nm pump system. (a) Structure of pump system with two stage amplification; (b) absorption spectrum of  $\text{H}^{79}\text{Br}$  molecule at  $2 \mu\text{m}$  band and energy level transition process corresponding to R(5) absorption line pumping; (c) output wavelength varying with  $V_{\text{tec}}$ ; (d) output 1958 nm laser power varying with pump power of main amplification stage; (e) pump spectra at different output pump powers

1958 nm 半导体激光器种子源的波长可以通过温控电压  $V_{\text{tec}}$  (范围为  $0 \sim 3 \text{ V}$ ) 来精确调节, 如图 1(c) 所示。可以发现, 在 1957.3~1959.7 nm 波长范围内, 波长随着  $V_{\text{tec}}$  线性变化, 调谐范围覆盖了 HBr 分子两个同位素的 R(5) 吸收波长 ( $\text{H}^{79}\text{Br}$  同位素相应的波长为 1957.79 nm,  $\text{H}^{81}\text{Br}$  同位素相应的波长为 1958.08 nm)。当泵浦源系统的中心波长精确调谐到  $\text{H}^{79}\text{Br}$  同位素的 R(5) 吸收线时, 最后

输出的  $2 \mu\text{m}$  泵浦光功率与主放大级的泵浦功率关系如图 1(d) 所示。可以发现, 输出的  $2 \mu\text{m}$  泵浦光功率随泵浦功率线性变化, 斜率效率为 27.5%,  $2 \mu\text{m}$  泵浦光的最大输出功率为 8 W。由于采用了两级放大的结构, 相较之前泵浦系统的最大输出功率 (3 W) 有了大幅提升<sup>[20]</sup>。在不同的泵浦源系统输出功率条件下得到的输出光谱如图 1(e) 所示。可以看出, 随着泵浦功率的增加, 输出光谱没有出现



明显的变化,光谱最高点与基底相差约 60 dBm,输出的泵浦能量主要集中在中心波长上。虽然泵浦源系统最大输出功率较之前有了提升,但是只有在泵浦光线宽小于 HBr 的吸收线宽时才能够有效吸收。利用自由光谱范围为 1.5 GHz 的 Fabry-Perot 干涉腔(美国 Thorlabs 公司生产,型号为 SA200-18C,分辨率为 7.5 MHz)对泵浦源系统不同输出功率情况下的光进行线宽测量<sup>[20]</sup>。可以发现,随着泵浦功率的增加,泵浦源的线宽基本保持不变,都在 10 MHz 左右,其结果也与图 1(e)中输出光谱保持不变的结果相一致。实际上,受限于 Fabry-Perot 腔的测量精度,该泵浦源系统的线宽结果不够准确。然而,相较线宽小于 2 MHz 的种子源,泵浦源系统最终的线宽虽然有所展宽,但是远小于 HBr 分子几百兆赫兹量级的吸收线宽<sup>[23]</sup>,泵浦光能够有效地被吸收。

## 2.2 单程结构空芯光纤 HBr 激光器的实验系统

传统气体激光器中存在气体腔作用距离短的问题,而 HCF 的出现很好地解决了这个问题,几十微米量级的纤芯区域和几米量级的作用距离,大大增强了泵浦光与增益气体介质的作用强度,提供了一个理想的作用环境,使激光器能够在无谐振腔条件下工作进而产生激光。充有 HBr 气体的 HCF 能够提供足够大的增益,实验装置为单程结构,如图 2 所示,其中 OSA 为光学频谱分析仪。泵浦源系统输出的光首先通过一个固定在三维调节架上的 D 镀膜平凸透镜(美国 Thorlabs 公司生产,型号为 LA1540-D,焦距为 15 mm,2  $\mu\text{m}$  波段的透过率大于 5%)使光纤输出的泵浦光变为平行光束。然后,利用两片镀银反射镜(美国 Thorlabs 公司生产,型号为 PF10-03-P01,2  $\mu\text{m}$  波段的反射率大于 96%)

进行准直。最后,利用另一个固定在三维调节架上的 D 镀膜平凸透镜(美国 Thorlabs 公司生产,型号为 LA1608-D,焦距为 75 mm,2  $\mu\text{m}$  波段的透过率大于 95%)将泵浦光聚焦耦合进 HCF,耦合效率约为 60%。HCF 的两端通过装有未镀膜的蓝宝石窗口(美国 Thorlabs 公司生产,型号为 WG31050,0.5~4.0  $\mu\text{m}$  波段的透过率约为 87%)的气体腔进行密封,气体腔通过气路管道与真空泵、装有 HBr 气体的取样钢瓶和气压计相连。在进行抽真空后,调节阀门缓慢充入 HBr 气体。在泵浦光耦合进 HCF 后激发 HBr 分子产生的中红外激光和残余的泵浦光通过输出端的气体腔窗口输出,输出光先后经过一个平凸透镜和红外带通滤波片进入功率计或光谱仪。其中,红外带通滤波片(美国 Thorlabs 公司生产,型号为 FB4250-500,中心波长透过率大于 70%)能够滤除残余的泵浦光。将红外带通滤波片安装在翻转架上,通过翻转翻转架可以控制输出光束直接进入功率计或者滤除残余泵浦光后剩余的 4  $\mu\text{m}$  波段激光进入功率计,总输出功率和产生激光的功率相减即可得到滤除的残余泵浦光功率。实验中用的 HCF 横截面电镜图如图 2 中右上角插图所示,长度为 5 m,纤芯微结构与之前一样<sup>[20]</sup>,HCF 通过纤芯区域进行导光,纤芯周围周期性地排布着 6 个毛细管,纤芯直径约为 80  $\mu\text{m}$ ,毛细管壁厚约为 0.7  $\mu\text{m}$ ,毛细管直径约为 38  $\mu\text{m}$ 。通过理论仿真可知,泵浦光和产生的激光都在 HCF 的传输带内,但没有合适的宽谱光源测量整个传输谱带。因此,将泵浦光和产生的激光分别作为单波长的光源,采用标准的截断法测得 2  $\mu\text{m}$  波段的传输损耗为 0.53 dB/m,4  $\mu\text{m}$  波段的传输损耗为 0.30 dB/m。

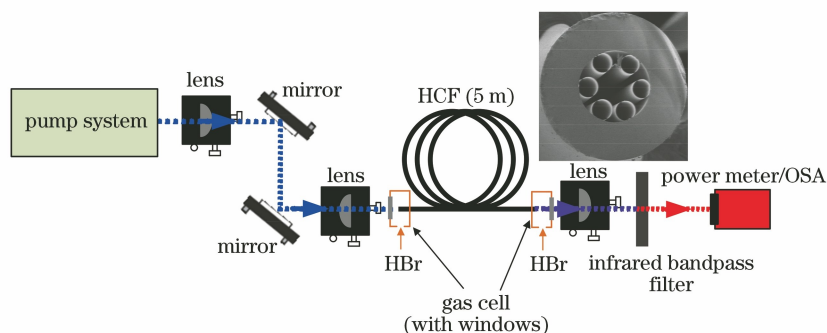


图 2 实验装置示意图,右上角插图为 HCF 横截面扫描电镜图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental equipments, upper right illustration is scanning electron microscope picture of HCF cross section

### 3 实验结果

#### 3.1 光谱特性

在不同的气压条件和入射功率条件下,精确调谐泵浦源系统波长分别与  $H^{79}Br$  和  $H^{81}Br$  两个同位素的 R(5)吸收线相匹配(对应吸收线的中心波长分别为 1957.79 nm 和 1958.08 nm),利用光谱仪(美国 Thorlabs 公司生产,型号为 OSA207C,光谱分辨率为 7.5 GHz)测量了泵浦两个同位素对应的输出光谱。图 3 展示了泵浦同位素  $H^{79}Br$  对应的输出光谱。当气压为 90 Pa 时,可以看到有两条输出谱线,分别是波长为 3912.6 nm 的激射谱线 R(5)和波长为 4263.5 nm 的激射谱线 P(7),其跃迁过程如图 1(b)所示。可以发现,这两条激射谱线共享一个上能级  $v=2$  振动态上的  $j=6$  的转动态,激射过程存在竞争。相较 R 支跃迁,P 支跃迁具有更大的发射截面<sup>[14]</sup>。在图 3(a)中,较低的入射泵浦功率(2.7 W)提供的增益也较低,激发的上能级粒子数首先跃迁到 P 支的下能级  $v=1$  振动态上  $j=7$  的转动态上,所以激射谱线 P(7)的强度较大。然而,

当入射泵浦功率增加到图 3(b)中较高的 7.8 W 时,P 支跃迁的下能级粒子数进一步积累,导致 P 支跃迁的上下能级反转粒子数下降,增益发生饱和,此时 R 支跃迁增益会超过 P 支跃迁,R(5)谱线强度变大。因此,在低气压情况下随着入射泵浦功率的增加,P 支跃迁增益逐渐发生饱和,在输出的 R(5)和 P(7)两条谱线中 R(5)谱线逐渐占据主导地位。当 HBr 气体的气压进一步增加时,由于 HCF 中 HBr 分子数在增加,故 P 支激射谱线的增益饱和需要更大的泵浦功率。然而,目前实验中使用的泵浦源系统的最大输出功率水平还不能使 P 支跃迁的增益发生饱和,故 R 支跃迁在竞争中无法占据优势,输出的谱线只包含了 P(7)跃迁谱线。因此,在较高气压的条件下,可以得到输出谱线仅为 P(7)的纯净光谱。同样,当泵浦同位素  $H^{81}Br$  时也可以得到类似的结果,由于同位素之间相同能级大小有微小差异<sup>[21]</sup>,故输出的两条谱线的波长有所差异,泵浦同位素  $H^{81}Br$  对应的激射谱线 R(5)和 P(7)的波长分别是 3913.2 nm 和 4264.0 nm。

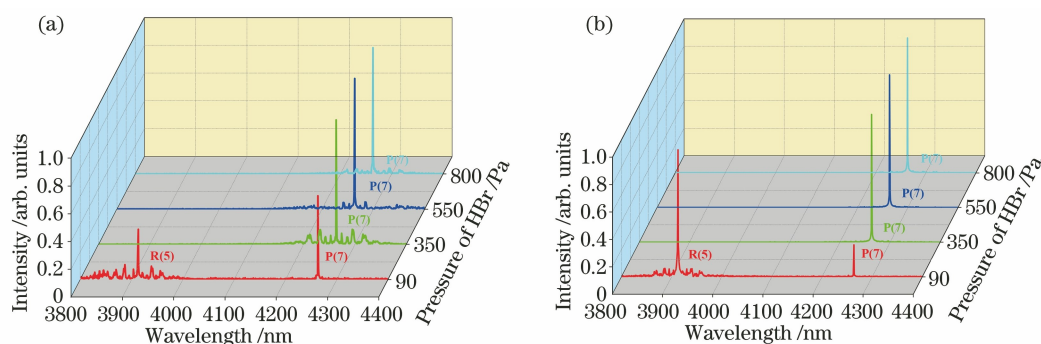


图 3 不同气压下的输出光谱特性。(a) 2.7 W 入射泵浦功率下输出光谱与气压的关系;

(b) 7.8 W 入射泵浦功率下输出光谱与气压的关系

Fig. 3 Characteristics of output spectra at different gas pressures. (a) Relationship between output spectra and pressure at incident pump power of 2.7 W; (b) relationship between output spectra and pressure at incident pump power of 7.8 W

#### 3.2 功率特性

除了测量 HCF 中泵浦 HBr 两个同位素的输出光谱外,还在不同的 HBr 气压条件下测量其输出功率特性,图 4(a)、(b)展示了泵浦  $H^{79}Br$  同位素时的输出功率特性。根据图 3 中光谱测量的结果可知,在 90 Pa 气压下,测得的输出功率是 R(5)和 P(7)两条跃迁谱线的功率之和。为保证输出中红外功率仅为 P(7)一条跃迁纯净谱线的功率,仅测量 350, 550, 800 Pa 下的输出功率特性。图 4(a)展示了输出功率与耦合泵浦功率间的关系。可以发现,气压增加导致 HBr 分子间的碰撞加剧,必须通过提高泵

浦强度将粒子以更快的速率从基态抽运到激发态<sup>[13]</sup>,产生激光的阈值随着气压的增加而增加。当耦合泵浦功率超过阈值后,输出激光功率随着耦合泵浦功率的增加而线性增加,没有发生饱和,这是因为受限于泵浦功率水平。理论上,低气压条件下泵浦功率应该率先发生饱和,泵浦功率如果能持续增加,其他气压条件下泵浦功率也能相继发生饱和。在 90 Pa 气压下,由于 HCF 中的分子数较少,故提供的增益也较小,此时输出的功率也较小。当气压增加到 350 Pa 和 550 Pa 时,增益增大,输出的功率也相应增加。在 550 Pa 气压下得到的最大输出功

率约为 350 mW, 相较之前 125 mW 的中红外输出功率有了大幅提升<sup>[20]</sup>。此外, 这两个气压条件下的输出功率特性相似, 斜率效率大致相同, 分别为 11.0% 和 10.4%。可以发现, 350 Pa 气压情况下的斜率效率稍大, 该情况下应该能得到最大的输出功率。然而, 在实验测量时最大入射的泵浦功率为 6.8 W, 低于 550 Pa 时的最大泵浦功率, 这会导致最大输出功率较小。当气压进一步增加到 800 Pa 时, HBr 的碰撞加剧, 导致的弛豫过程会降低激光

跃迁的上能级寿命, 进而增益下降, 输出功率也随之下降, 此时最大输出功率约为 240 mW。图 4(b) 展示了输出功率转换效率(输出激光功率与耦合泵浦功率之比)随耦合泵浦功率的变化。在超过阈值后, 转换效率随着耦合泵浦功率的增加而逐渐增加, 最后趋于平稳。在 350 Pa 和 550 Pa 气压下得到最大的转换效率约为 8%, 而空间光与 HCF 模场不匹配、HCF 的损耗较大和 HCF 长度不是最佳都可能是转换效率较低的原因。

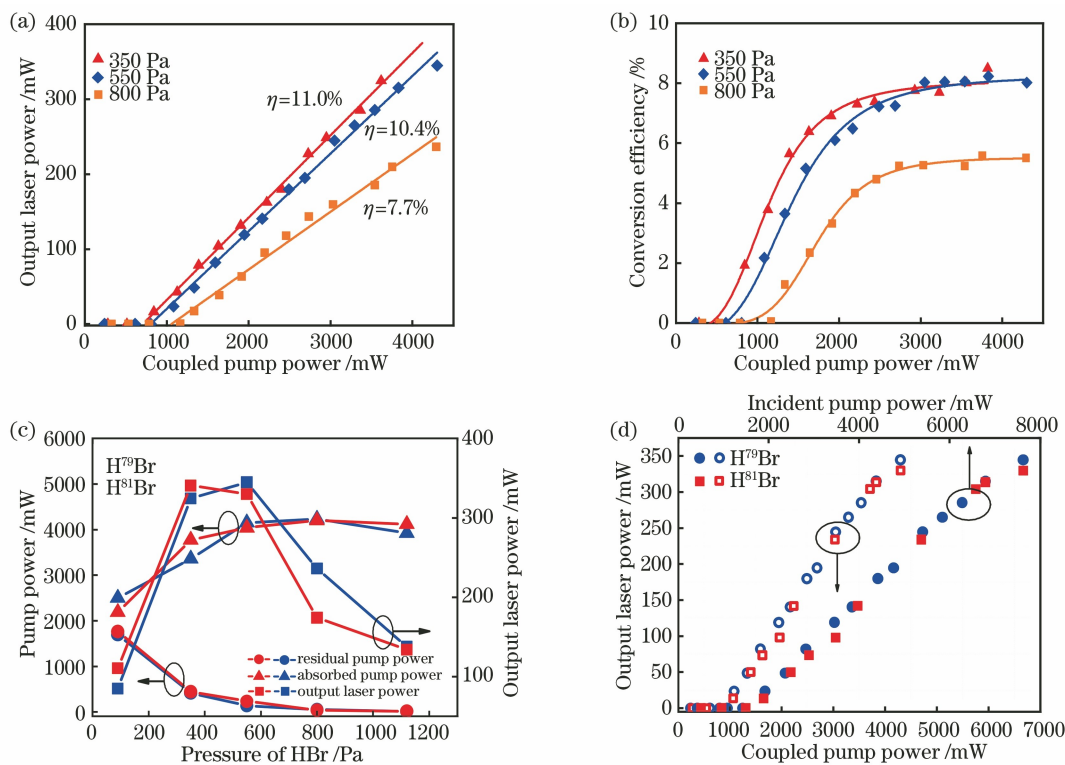


图 4 输出功率特性。(a)在不同气压下泵浦 H<sup>79</sup>Br 同位素时的输出激光功率, 分立的点是测量的实际数据, 实线是相应的拟合线; (b)在不同气压下泵浦 H<sup>79</sup>Br 同位素时的转换效率随耦合泵浦光功率的变化, 分立的点是测量的实际数据, 实线是相应的拟合线; (c)当泵浦 H<sup>79</sup>Br 和 H<sup>81</sup>Br 同位素时, 最大输出功率、残余泵浦光和吸收泵浦光随气压的变化; (d)在 550 Pa 气压下泵浦 H<sup>79</sup>Br 和 H<sup>81</sup>Br 同位素时, 输出功率随入射泵浦功率和吸收泵浦功率的变化

Fig. 4 Characteristics of output power. (a) Output laser powers at different pressures when pumping H<sup>79</sup>Br isotope, discrete points are measured data, and solid lines are corresponding fitted lines; (b) conversion efficiency varying with coupled pump power at different pressures when pumping H<sup>79</sup>Br isotope, discrete points are measured data, and solid lines are corresponding fitted lines; (c) maximum output power, residual pump power and absorbed pump power varying with pressure when pumping H<sup>79</sup>Br and H<sup>81</sup>Br isotopes; (d) output power varying with incident pump power and absorbed pump power when pumping H<sup>79</sup>Br and H<sup>81</sup>Br isotopes at pressure of 550 Pa

图 4(c)对比了 H<sup>79</sup>Br 和 H<sup>81</sup>Br 同位素在不同气压下对应的残余泵浦光、吸收泵浦光和最大输出功率。可以发现, 在 90 Pa 气压下, HCF 中的 HBr 分子数较少, 提供的增益也较小, 进而输出的功率也较小, 其值仅为 100 mW 左右。当气压从 90 Pa 逐渐增加时, HCF 中的分子数密度逐渐增加, 分子对

泵浦光的吸收逐渐加强, 残余泵浦光下降, 增益逐渐增大, 输出激光功率也逐渐增加。当气压达到最佳气压时获得最大输出功率, H<sup>79</sup>Br 同位素的最大输出功率为 350 mW, H<sup>81</sup>Br 同位素的最大输出功率为 340 mW。随着气压的进一步增加, 泵浦光大部分被吸收, 吸收的泵浦光不再变化, 泵浦光功率约为



4 W, 此时仅剩几十毫瓦的泵浦光, 这也说明当泵浦光线宽远小于 HBr 分子的吸收线宽时, 泵浦光能够被充分吸收。然而, 此时 HBr 分子之间的碰撞会占据主导, 这会导致增益下降, 激光阈值增加, 进而导致输出激光功率下降。图 4(d) 展示了在 550 Pa 气压下泵浦  $H^{79}Br$  和  $H^{81}Br$  同位素时, 输出功率随入射泵浦功率和吸收泵浦功率的变化。可以看出,  $H^{79}Br$  和  $H^{81}Br$  两种同位素对应的输出功率变化规律类似, 没有明显的区别。在入射泵浦功率和吸收泵浦功率超过阈值后, 输出功率线性增加, 分别达到 350 mW 和 330 mW 的最大输出功率。

### 3.3 中红外激光光斑测量

中红外激光的广泛应用对激光光斑的测量提出了越来越高的要求, 但中红外波段探测器中 InSb、HgCdTe 和 PbSe 等响应率对温度较敏感, 故中红外光斑并不容易测量。依赖基于相关滤波方法的光学相关分析可以实时探测光纤输出的光束质量, 此类光学相关方法包括计算全息图和空间光调制器<sup>[24-25]</sup>, 但该方法仍然受到硬件速度、精度和价格的限制。为了分析 HCF 中产生的中红外激光模式, 基于图 5(a) 所示的实验装置利用扫描法来检测输出的  $4 \mu m$  激光的强度分布。

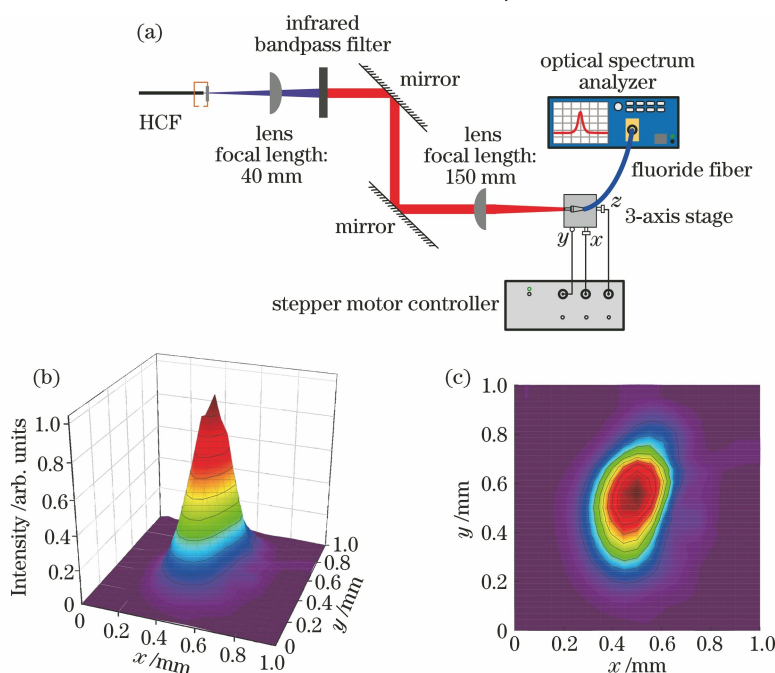


图 5 扫描法测模场分布。(a)  $4 \mu m$  激光模场分布测量的实验装置; (b) 三维中红外激光光斑强度分布; (c) 二维中红外激光光斑强度分布

Fig. 5 Mode field profiles measured by scanning method. (a) Experimental setup for measurement of mode field profile of  $4 \mu m$  laser; (b) intensity distribution of three-dimensional mid-infrared laser spot; (d) intensity distribution of two-dimensional mid-infrared laser spot

测量时 HCF 中填充的 HBr 的气压为 400 Pa, 根据图 3 可知输出光谱仅为 P(7) 一条谱线, 同时 HCF 输出端经过中红外带通滤波片后残余的泵浦光可被滤除。焦距分别为 40 mm 和 150 mm 的透镜可以对输出中红外光斑进行放大, 两个反射镜用于保持光轴准直。芯径为  $100 \mu m$  的氟化物光纤 (美国 Thorlabs 公司生产, 型号为 MF12L1, 工作波长范围为  $310 \sim 5500 \text{ nm}$ ) 一端与测量图 3 中红外光谱的光谱仪相连作为点探测器, 并利用光谱的强度大小反映中红外光斑在该探测点的强度大小。氟化物光纤的另一端在第二个透镜的焦距位置处固定在

由步进电机控制器驱动的三维调节架上 (美国 Thorlabs 公司生产, 型号为 NanoMax 300,  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴的行程均为 4 mm)。设计了一个 LabView 程序自动控制步进电机使三维调节架在横向  $x$ 、 $y$  方向逐点扫描, LabView 程序同时在扫描的每一个点处读出与氟化物光纤连接的光谱仪上的光谱强度并将数据采集, 随后可得到最终的光斑强度分布。根据实验情况, 设置了  $20 \times 20$  个点的扫描平面阵列, 受到光谱仪响应速度的限制, 每个点需要几秒钟的响应时间。输出的  $4 \mu m$  激光光斑强度的三维和二维分布分别如图 5(b) 和图 5(c) 所示。可以看出, 中

红外激光的模式分布为单横模。强度分布的不对称性可能是为保证良好的气密性, HCF 在输出气体腔中受到轻微挤压造成的, 这可以通过使用全光纤实验结构代替自由空间耦合来避免。此外, 受限于氟化物光纤  $100\ \mu\text{m}$  的芯径, 仅选取了  $20 \times 20$  个的扫描点, 测量的分辨率不高并且输出的中红外激光功率会有一些波动, 故点与点之间的强度会有些许突变, 今后可以选取纤芯直径较小的中红外光纤及更多的扫描点来改善测量结果。

## 4 结 论

利用自行搭建的两级放大的  $2\ \mu\text{m}$  波段掺铥光纤放大器泵浦一段  $5\ \text{m}$  长且充低压 HBr 气体的 HCF, 实现了  $4.3\ \mu\text{m}$  附近 P(7) 一条纯净的单谱线的中红外激光输出。泵浦波长调谐范围可以覆盖 HBr 两个同位素  $\text{H}^{79}\text{Br}$  和  $\text{H}^{81}\text{Br}$  的 R(5) 吸收线, 其输出 R(5) 和 P(7) 两条谱线可以通过气压和输入功率进行有效控制。在最佳气压条件下, 可以得到的最大输出功率为  $350\ \text{mW}$ , 相对耦合泵浦功率的转换效率为  $8\%$ 。泵浦 HBr 不同同位素的输出特性没有明显区别, 通过扫描法测量输出的中红外光斑发现其显示出了良好的单模特性。后续将通过合理设计 HCF 的结构尺寸来进一步降低中红外波段的传输损耗, 提高泵浦耦合效率(全光纤结构耦合是一种有前景的方式)。优化气压和 HCF 的长度参数可以实现转换效率高、结构紧凑、输出功率高和输出谱线可控的中红外光纤气体激光器, 该激光器具有广泛的应用前景和重要的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 423-431.
- [2] Jackson S D, Jain R K. Fiber-based sources of coherent MIR radiation: key advances and future prospects (invited)[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 30964-31019.
- [3] Henderson-Sapir O, Malouf A, Bawden N, et al. Recent advances in  $3.5\ \mu\text{m}$  erbium-doped mid-infrared fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(3): 6-14.
- [4] Wieliczka D M, Weng S, Querry M R. Wedge shaped cell for highly absorbent liquids: infrared optical constants of water[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(9): 1714-1719.
- [5] Godard A. Infrared ( $2\text{--}12\ \mu\text{m}$ ) solid-state laser sources: a review[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2007, 8(10): 1100-1128.
- [6] Bandyopadhyay N, Bai Y, Gokden B, et al. Watt level performance of quantum cascade lasers in room temperature continuous wave operation at  $\lambda \sim 3.76\ \mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(13): 131117.
- [7] Faucher D, Bernier M, Androz G, et al. 20 W passively cooled single-mode all-fiber laser at  $2.8\ \mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1104-1106.
- [8] Breunig I, Haertle D, Buse K. Continuous-wave optical parametric oscillators: recent developments and prospects[J]. *Applied Physics B*, 2011, 105(1): 99-111.
- [9] Isaenko L I, Yelissev A P. Recent studies of nonlinear chalcogenide crystals for the mid-IR[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2016, 31(12): 123001.
- [10] Nampoothiri A V V, Jones A M, Fourcade-Dutin C, et al. Hollow-core optical fiber gas lasers (HOFGLAS): a review [invited][J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(7): 948-961.
- [11] Jones A M, Nampoothiri A V V, Ratanavis A, et al. Mid-infrared gas filled photonic crystal fiber laser based on population inversion[J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 2309-2316.
- [12] Wang Z F, Belardi W, Yu F, et al. Efficient diode-pumped mid-infrared emission from acetylene-filled hollow-core fiber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21872-21878.
- [13] Wang Z F, Yu F. Diode-pumped single-pass mid-infrared fiber gas laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1014002.  
王泽锋, 于飞. 半导体抽运的单程中红外光纤气体激光器[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1014002.
- [14] 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.
- [15] Xu M R, Yu F, Knight J. Mid-infrared 1 W hollow-core fiber gas laser source[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(20): 4055-4058.
- [16] Dadashzadeh N, Thirugnanasambandam M P, Weerasinghe H W K, et al. Near diffraction-limited performance of an OPA pumped acetylene-filled hollow-core fiber laser in the mid-IR[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13351-13358.
- [17] Zhou Z Y, Tang N, Li Z X, et al. High-power tunable mid-infrared fiber gas laser source by acetylene-filled hollow-core fibers [J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 19144-19153.
- [18] 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.
- [19] Cui Y L, Huang W, Wang Z F, et al. 4.3  $\mu\text{m}$  fiber laser in  $\text{CO}_2$ -filled hollow-core silica fibers [J]. *Optica*, 2019, 6(8): 951-954.
- [20] Zhou Z Y, Li H, Cui Y L, et al. Optically pumped 4  $\mu\text{m}$  CW HBr gas laser based on hollow-core fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1614001.
- 周智越, 李昊, 崔宇龙, 等. 基于空芯光纤的光泵浦 4  $\mu\text{m}$  连续波 HBr 气体激光器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1614001.
- [21] Miller H C, Radzykewycz D T, Hager G. An optically pumped mid-infrared HBr laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(10): 2395-2400.
- [22] HITRAN spectroscopic database [DB/OL]. [2020-12-12]. <http://hitran.iao.ru/molecule>.
- [23] Botha L R, Bollig C, Esser M J D, et al. Ho: YLF pumped HBr laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20615-20622.
- [24] Flamm D, Naidoo D, Schulze C, et al. Mode analysis with a spatial light modulator as a correlation filter [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2478-2480.
- [25] Kaiser T, Flamm D, Schröter S, et al. Complete modal decomposition for optical fibers using CGH-based correlation filters [J]. *Optics Express*, 2009, 17(11): 9347-9356.