

气流方向 Z 型折叠离轴混合非稳腔研究

李卿*, 刘现魁, 任晓明, 邱雄飞, 李金雪, 郭建增

中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027

摘要 提出并研究了一种气流方向 Z 型折叠离轴混合非稳腔, 应用在小形化 DF 气流化学激光装置中(增益体积为 $30\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 125\text{ mm}$), 实现了平均功率 550 W 、光束质量 β 值 1.8 (稳定腔方向 β 值为 1.5 , 非稳定腔方向 β 值为 1.9)、光谱覆盖 $3680 \sim 4089\text{ nm}$ 的中红外连续激光输出。该腔在气流方向是平凹稳定腔, 并且进行了 Z 型折叠以减小稳定腔方向上的增益尺寸; 在高度方向是正支共焦非稳腔。针对稳定腔方向上远场光斑从高阶横模振荡到基横模振荡的物理过程进行了理论计算与实验研究, 光腔振荡的计算结果与实验结果吻合较好。计算与实验结果表明, 气流方向 Z 型折叠离轴非稳腔可用在小形化、紧凑型 DF 气流化学激光装置中, 实现高功率、高光束质量中红外连续激光输出。

关键词 激光器; 离轴混合非稳腔; DF 气流化学激光; 光束质量; 中红外激光

中图分类号 O436

文献标识码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2301007

1 引言

混合非稳腔具有高提取效率、高光束质量的优点, 近年来广泛应用于板条固体激光以及气体激光系统中, 受到国内外普遍关注^[1-6]。该腔的稳定腔方向应用于增益横截面的较窄尺寸方向(一般称厚度方向)实现高效增益能量提取的同时抑制高阶横模振荡, 非稳定腔方向应用于增益横截面的较宽尺寸方向(一般称高度方向)实现单基横模振荡, 从而保证了高度方向的光束质量。1990 年, 日本学者 Kuba 等^[1]提出在板条激光器中采用离轴混合非稳腔提高输出激光的光束质量, 板条增益介质厚度方向尺寸为毫米量级, 用于稳定腔方向, 高度方向尺寸为十几毫米, 用于非稳定腔方向。2006 年, 德国宇航中心学者 Handke 等^[2]提出在氧碘化学激光器上采用负支离轴混合非稳腔, 实现了功率为 6.6 kW 的连续激光输出。2008 年, 德国宇航中心学者 Pargmann 等^[3]为了抑制氧碘化学激光器稳定腔方向上的高阶模式振荡, 提出了 U 型折叠负支离轴混合非稳腔, 并实现了 4.5 kW 的连续激光输出, 在稳定腔和非稳定腔方向上的光束质量因子分别为 3.9 和 1.25 。2010 年, 北京理工大学张恒利等^[4]利用激光二极管端面抽运 Nd:YAG 板条晶体, 结合离轴混合非稳腔实现了高提取效率激光输出, 但是稳定腔方向上的光束质量不佳。2016 年, 北京理工大学苑佳华等^[5]利用端面抽运板条激光, 基于正支离轴混合非稳腔实现了 160 W 激光输出, 测得光束质量因子在稳定腔和

非稳定腔方向上分别为 2.21 和 1.37 。2020 年, 中国科学院理化技术研究所 Guo 等^[6]采用同轴混合非稳腔, 基于 Nd:YAG 介质, 实现了平均功率 24.6 kW 的准连续激光输出, 重复频率 400 Hz , 脉宽 $200\text{ }\mu\text{s}$, 自适应光学校正后的光束质量 β 值为 1.5 。

至今尚无混合非稳腔应用在 DF 气流化学激光装置中实现高功率、高光束质量中红外连续激光输出的报道。我们提出并研究了气流方向 Z 型折叠离轴混合非稳腔, 并将其应用在小形化、紧凑型 DF 气流化学激光装置中, 实现了平均功率 550 W 、光束质量 β 值为 1.8 (稳定腔方向 β 值为 1.5 , 非稳定腔方向 β 值为 1.9)、光谱覆盖 $3680 \sim 4089\text{ nm}$ 的中红外连续激光输出, 并从理论计算和实验上研究了稳定腔方向上远场光斑从高阶横模振荡向单基横模振荡转变的物理过程。

2 实验设计与仿真原理

2.1 离轴混合非稳腔与测试光路

离轴混合非稳腔如图 1 所示, 共由 4 件腔镜组成, 所有腔镜基底材料均为单晶硅, 镀中红外波段的高反射率介质膜, 反射率大于 99.9% 。图 1 中的 Y 方向凸柱面镜 1 与凹球面镜 4 分别组成 X 方向(即增益发生器经超音速喷管的气流方向, 也称激活区方向)上的平凹稳定腔以及 Y 方向(即增益发生器的高度方向)上的正支共焦非稳腔, 气流方向上的 Z 型折叠通过转折平面镜 2 和转折平面镜 3 实现, 凹球面镜 4 的曲率半径为 10.8 m , 凸柱面镜 1 的曲率半

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-03-14; 录用日期: 2022-04-14

基金项目: 国家高技术发展计划(51326010201)

通信作者: *moyi6969@163.com

径为 9 m, Z 型折叠后腔长为 0.9 m, 其中非稳定腔方向上的放大率即 M 值为 1.2。增益介质由燃烧驱动的 DF 增益发生器产生, 将氮气用作稀释剂, 增益气流静压低, 一般小于 666.7 Pa, 气流方向上的增益

尺寸约为 30 mm, 高度方向上的增益尺寸为 40 mm, 激光单通增益长度为 125 mm, Z 型折叠后增益长度为 375 mm。增益发生器模块与光腔模块虚拟装配示意图如图 2 所示。

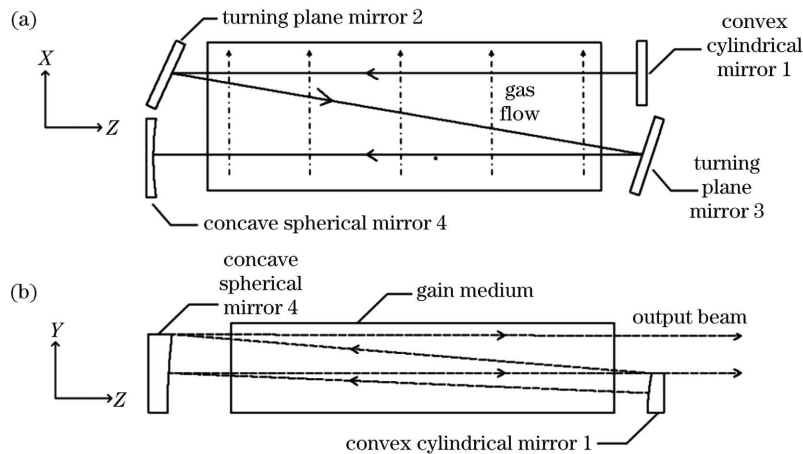


图 1 气流方向 Z 型折叠离轴混合非稳腔示意图。(a)增益介质的气流方向(X 方向);(b)增益介质的高度方向(Y 方向)。激光光轴方向为 Z 方向

Fig. 1 Schematic diagram of Z-folded off-axis hybrid unstable resonator. (a) Gas flow direction of gain medium (X direction); (b) height direction of gain medium (Y direction). Laser optical axis direction is Z direction

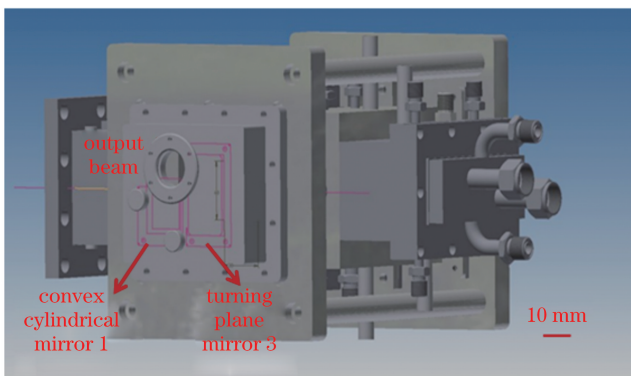


图 2 DF 增益发生器模块与光腔模块虚拟装配示意图

Fig. 2 Virtual assembly diagram of gain generation module and optical cavity module

所述 Z 型折叠离轴非稳腔在 Y 方向上是共焦非稳定腔, 可以实现大口径基横模尺寸, 从而有利于 Y 方向上的高光束质量激光输出; 在 X 方向上是平凹稳定腔, 有助于高效率提取增益能量、降低输出耦合率。输出耦合率从传统共焦非稳腔的 $1-1/M^2$ 变为离轴混合非稳腔的 $1-1/M$ (此处 M 为非稳腔的放大率), 所述混合非稳腔输出耦合率为 16.6%。该腔型存在的主要问题是 X 方向上高阶横模容易起振, 从而造成 X 方向上的光束质量劣化 (远场光斑在 X 方向形成多光斑的情况)^[3-4]。为了解决 X 方向高阶横模振荡的问题, 需要限制 X 方向上的增益尺寸, 因此在气流方向加入两块转折平面镜进行 Z 型折叠, 将 X 方向可利用的增益尺寸从 30 mm 减少到 10 mm。输出光束通过 Y 方向凸柱面镜 1 的上边缘输出, 如图 1(b) 所示, 输出光斑为矩形实心光斑, 气流方向尺寸为 10 mm, 高度方向尺寸为 6.6 mm。为降低输出光束对凸柱面

镜 1 上边缘的损伤、减少该腔镜的热累积, 该腔镜上边缘设置了扩张角, 并且在抛光过程中确保上边缘无倒角且抛光、锐利无缺陷。

值得一提的是, 随着气体高压存储技术、材料轻量化技术及尾气低温吸附技术的快速进步^[7], 包含气体供给模块、光腔模块、增益发生器模块、尾气低温吸附模块在内的该小型化 DF 气流化学激光装置紧凑化程度高, 体积小于 0.1 m^3 , 出光过程中安静运行, 无废气排放。

采用图 3 所示监测光路, 分别对输出功率、远场光斑、输出光谱以及近场光斑进行测试。输出光束经由镀有 45° 分光介质膜的 CaF_2 分光镜 (0.1% 透过), 反射强光注入功率计进行输出功率的测量、记录, 透射弱光经过焦距 300 mm 的 CaF_2 基质的圆透镜聚焦至中红外热像仪靶面用于测量、记录其远场光斑, 圆透镜前后表面镀增透膜, 热像仪前放置基底为 ZnSe 的中性密度滤光片用于弱光衰减。此外, 通过将圆透镜移除、放置漫反射屏, 利用热像仪观察漫反射屏, 可以测量、记录输出光束的近场光斑。通过用傅里叶光谱仪观察 45° 分光镜上的输出光斑, 利用分光镜上的漫反射可以进行输出光束光谱的监测与记录。考虑到量热式功率计响应时间比较长, 该 Z 型折叠离轴非稳腔出光时间大于 2 s。功率计由探头、表头、数据采集器、水冷机组组成。基于小型化 DF 增益发生器, 我们采用 Z 型折叠离轴混合非稳腔实现了中红外连续激光输出, 功率计测试结果为 670 W。

2.2 光腔仿真计算方法

基于平面波角谱的衍射理论^[8-10], 利用快速傅里叶变换对 Z 型折叠离轴混合非稳腔的振荡自再现模

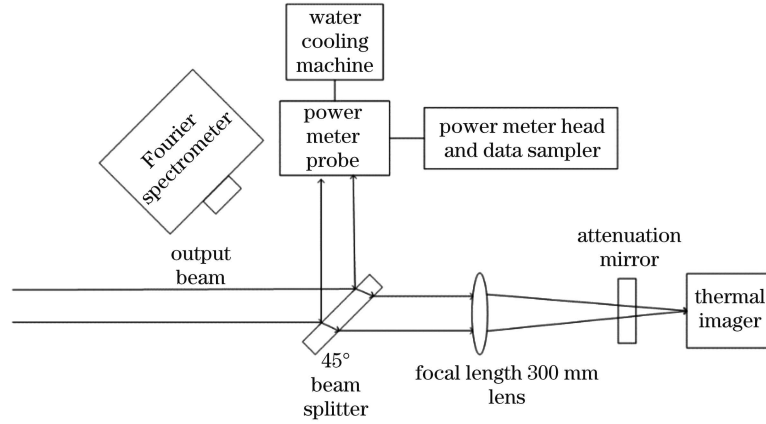


图 3 输出光束功率、远场光斑和光谱的监测光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of monitoring optical path for power, far-field spot and spectrum of output beam

进行计算。在计算中,用于光腔振荡的种子光束是符合增益介质截面(30 mm×45 mm)的平面波,光腔中存在 4 片镜片,种子光束在凹球面镜 4 与凸柱面镜 1 之间来回振荡并经历增益饱和后形成具有稳定强度与相位分布的自再现模,其中 2 片用于 Z 型折叠的平面转折镜对腔内光场无相位作用,因此在腔模计算中仅等效于腔长的增加。中心波长 λ 设置为 3800 nm,采样数目 N 值为 8192×8192 ,入瞳窗尺寸 W 为 300 mm,空间域分辨率为 $36 \mu\text{m}$,频率域分辨率为 0.03 cm^{-1} ,腔镜参数、腔长、增益长度均与上述实验所用参数保持一致。

令波矢为 $k, k=2\pi/\lambda; x$ 与 y 为空间位置坐标; u 与 v 为空间频率坐标; L_{gain} 为等效增益长度 ($3 \times 125 \text{ mm}$); g 为小信号增益系数,其在气流方向上具有类抛物线状的强度分布^[11]; I_{sat} 为饱和光强; f_1 与 f_2 分别为凹球面镜 4 和凸柱面镜 1 的焦距; r_1 与 r_2 分别为凹球面镜 4 与凸柱面镜 1 的反射率分布。

首先,种子光束 $U_1(x, y, 0)$ 从凸柱面镜 1 出发传播腔长距离 L 后,变成复振幅光场 $U_2(x, y, L)$ 。该物理过程由以下公式体现:

$$A(u, v, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_1(x, y, 0) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy, \quad (1)$$

$$A(u, v, L) = A(u, v, 0) \cdot \exp[ikL \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}], \quad (2)$$

$$U_2(x, y, L) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(u, v, L) \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv. \quad (3)$$

复振幅光场 $U_2(x, y, L)$ 进行增益饱和和计算后变成 $U_3(x, y, L)$, 由于放大率 M 值较小、腔长较短,因此可以采用薄层增益进行近似^[12]:

$$U_3(x, y, L) = U_2(x, y, L) \cdot \exp \left[L_{\text{gain}} \frac{g(x, y)}{1 + \frac{2|U_2(x, y, L)|^2}{\left(\frac{W}{N}\right)^2 I_{\text{sat}}}} \right]. \quad (4)$$

然后复振幅光场 $U_3(x, y, L)$ 通过凹球面镜 4 反射后经过增益介质与腔长返回至凸柱面镜 1, 该物理过程由以下公式体现:

$$U_4(x, y, L) = U_3(x, y, L) \cdot r_1 \cdot \exp\left(-ik \frac{x^2 + y^2}{2f_1}\right), \quad (5)$$

$$U_5(x, y, L) = U_4(x, y, L) \cdot \exp \left[L_{\text{gain}} \frac{g(x, y)}{1 + \frac{2|U_4(x, y, L)|^2}{\left(\frac{W}{N}\right)^2 I_{\text{sat}}}} \right], \quad (6)$$

$$A'(u, v, L) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_5(x, y, L) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy, \quad (7)$$

$$A'(u, v, 2L) = A'(u, v, L) \cdot \exp[ikL \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}], \quad (8)$$

$$U_6(x, y, 2L) = \int_{-\infty}^{+\infty} A'(u, v, 2L) \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv. \quad (9)$$

最后复振幅光场 $U_6(x, y, 2L)$ 经过凸柱面镜 1 反射后的光场 $U_7(x, y, 2L)$ 再次赋值给 $U_1(x, y, 0)$, 从而重复上述过程循环迭代。另外一部分光场 $(1-r_2)U_6(x, y, 2L)$ 通过凸柱面镜 1 输出, 其中复振幅光场 $U_6(x, y, 2L)$ 被凸柱面镜 1 反射的过程表示为

$$U_7(x, y, 2L) = U_6(x, y, 2L) \cdot r_2 \cdot \exp(ik \frac{y^2}{2f_2}). \quad (10)$$

当输出光束 $(1-r_2)U_6(x, y, 2L)$ 的振幅与相位或者腔内输出耦合率收敛到一个稳定值后, 即可认为光腔达到稳态, 出现自再现模。输出光束经过焦距 F 的圆透镜聚焦后得到其焦斑形态, 即输出光束的远场焦斑 $I(x_0, y_0)$ 。远场焦斑的计算基于夫琅禾费衍射公式^[10], 具体计算式为

$$I(x_0, y_0) = \left(\frac{1}{\lambda F} \right)^2 \left| \int_{-\infty}^{+\infty} [(1 - r_2) U_6(x, y, 2L)] \exp\left(-ik \frac{x_0 x + y_0 y}{F}\right) dx dy \right|^2. \quad (11)$$

3 分析与讨论

离轴混合非稳光腔振荡的远场光斑计算结果如图 4 所示,其中图 4(a)、图 4(b)与图 4(c)分别对应气流方向上的增益尺寸被凹球面镜 4 前的矩形光阑(增益在 Y 方向即高度方向上无限制)限制为 10 mm、8 mm 以及 6.5 mm 的结果。可以看出由图 4(a)到图 4(c),由于在 Y 方向是共焦非稳腔,仅单横模振荡光束质量较好。此外,可以观察到因为腔内光束在 Y 方向输出的同时存在边缘硬边衍射^[13],所以远场光斑在 Y 方向上相比 X 方向存在更多、能量占比更大的旁瓣。图 4(a)与图 4(b)的远场光斑在 X 方向上均出现了高阶横模振荡,分别出现了三个和两个亮核光斑。

根据稳定腔的自再现模式理论^[14],经过计算可知该平凹稳定腔基横模的尺寸约为 4 mm,则其二阶横

模光斑 TEM₁₀ 尺寸为 6.9 mm,三阶横模 TEM₂₀ 光斑尺寸为 8.9 mm。若气流方向上的增益尺寸大于 8.9 mm,则腔内气流方向上 TEM₂₀ 模式可能会显著振荡。当气流方向上的增益尺寸小于 8.9 mm、大于 6.9 mm 时,相比三阶横模 TEM₂₀ 模式,二阶横模 TEM₁₀ 可能会显著振荡并得到有效放大。上述计算结果说明:当气流方向上的增益尺寸大于 6.9 mm 时,气流方向上的稳定腔会显著存在基横模与高阶横模的竞争,哪个模式会成为主导模式需要综合考虑增益介质的增益系数、增益分布以及不同模式下的增益与衍射损耗、输出损耗。如图 4(a)、图 4(b)所示,通过包含增益介质的光腔振荡计算结果可知,若气流方向上的增益尺寸大于 7.5 mm,高阶横模就会成为模式竞争中的主导力量并劣化气流方向光束质量;如图 4(c)所示,当气流方向增益尺寸限制为 6.5 mm 时,在气流方向上可以获得 TEM₀₀ 基横模振荡。

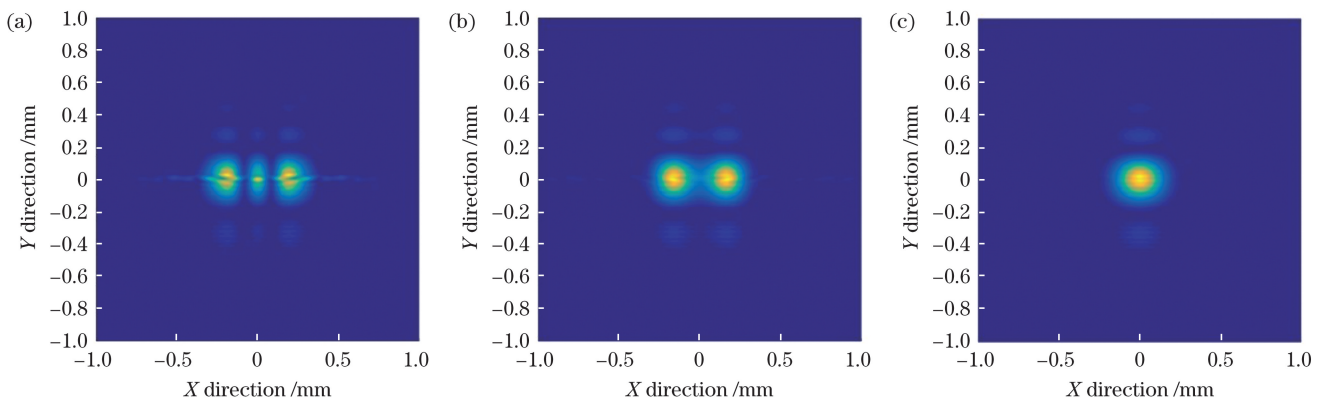


图 4 输出光束的远场光斑计算结果。(a)气流方向增益尺寸被限制为 10 mm;(b)气流方向增益尺寸被限制为 8 mm;(c)气流方向增益尺寸被限制为 6.5 mm

Fig. 4 Far-field spots of output beam in numerical calculation. (a) Gain size in gas flow direction is limited to 10 mm; (b) gain size in gas flow direction is limited to 8 mm; (c) gain size in gas flow direction is limited to 6.5 mm

图 5 是远场光斑实验结果,其中图 5(a)、图 5(b)与图 5(c)分别对应气流方向上的增益尺寸被凹球面镜 4 前的矩形光阑(增益在 Y 方向上无限制)限制为 10 mm、8 mm 以及 6.5 mm。实验结果与数值计算结果符合较好,图 5 与图 4 远场光斑一一对应。当矩形光阑气流方向增益尺寸分别被限制为 10 mm 与 8 mm 时,实验中近场光斑(10 mm×6.6 mm,8 mm×6.6 mm)与远场光斑在强度分布上分别具有三亮核光斑与二亮核光斑的特征,呈现为厄米-高斯高阶横模,远场光斑在气流方向上的光束质量 β 值分别是 4.2 和 3.4。随着气流方向上增益尺寸被限制至 6.5 mm,我们在实验上获得高光束质量的连续激光输出,光束质量 β 值^[15]为 1.8,气流方向即稳定腔方向上的光束质量为 1.5,非稳定腔方向上的光束质量为 1.9,非稳定

腔方向上旁瓣增多、光束质量差主要是凸柱面镜 1 的硬边缘衍射造成的。需要说明的是,随着气流方向增益尺寸由 10 mm 限制为 6.5 mm,输出连续激光功率由 670 W 降低为 550 W。此外,当气流方向增益尺寸被限制为 6.9 mm 时,虽然远场热像仪已经显示出光时间内大部分存在的是 TEM₀₀ 基模单核远场光斑,但是局部帧仍然存在 TEM₁₀ 模双核远场光斑。

在该功率下,利用傅里叶光谱仪测定了输出光谱。傅里叶光谱仪的波数分辨率为 1 cm^{-1} ,探测器为 InSb 中红外探测器。该腔输出激光光谱范围覆盖 3680~4089 nm,如图 6 所示。不同谱线之间强度有明显差异,这主要反映了增益激活介质的温度属性,并且不同谱线的小信号增益系数值及其沿气流方向的增益分布也有差别^[16-17]。

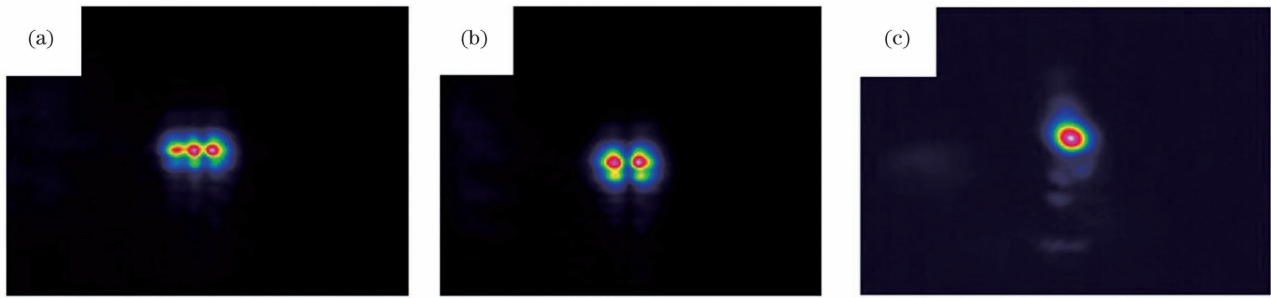


图 5 输出光束的远场光斑实验结果。(a)气流方向增益尺寸被限制为 10 mm;(b)气流方向增益尺寸被限制为 8 mm;(c)气流方向增益尺寸被限制为 6.5 mm

Fig. 5 Far-field spots of output beam in experiment. (a) Gain size in gas flow direction is limited to 10 mm; (b) gain size in gas flow direction is limited to 8 mm; (c) gain size in gas flow direction is limited to 6.5 mm

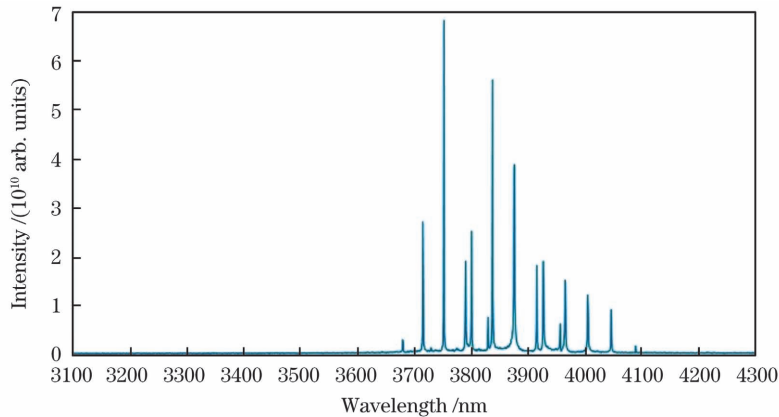


图 6 输出激光光谱

Fig. 6 Laser spectrum

4 结 论

为了基于小型化 DF 增益发生器(增益体积为 $30\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 125\text{ mm}$)实现高光束质量、高功率的中红外激光输出,本文提出利用气流方向 Z 型折叠离轴混合非稳腔作为 DF 化学激光装置的光学谐振腔,并对该腔气流方向上的光束质量进行了理论与实验研究,实现了平均功率 550 W、光束质量 β 值为 1.8 (稳定腔方向 β 值为 1.5,非稳定腔方向 β 值为 1.9)、光谱覆盖 3680~4089 nm 的中红外连续激光输出。该混合非稳腔的研究与应用有助于推动中红外 DF 气流化学激光朝着紧凑型、小型化的方向迈进。

参 考 文 献

- [1] Kuba K, Yamamoto T, Yagi S. Improvement of slab-laser beam divergence by using an off-axis unstable-stable resonator [J]. *Optics Letters*, 1990, 15(2): 121-123.
- [2] Handke J, Schall W O, Hall T, et al. Chemical oxygen-iodine laser power generation with an off-axis hybrid resonator [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3831-3838.
- [3] Pargmann C, Hall T, Duschek F, et al. Hybrid resonator in a double-pass configuration for a chemical oxygen iodine laser [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(35): 6644-6649.
- [4] 张恒利, 闫莹, 刘洋, 等. 激光二极管阵列端面抽运混合腔 Nd:YVO₄ 板条 1064 nm 和 1342 nm 激光特性研究 [J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2766-2768.
Zhang H L, Yan Y, Liu Y, et al. Laser diode stack end-pumped Nd:YVO₄ slab laser with hybrid resonator at 1064 nm and 1342 nm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(11): 2766-2768.
- [5] 苑佳华, 张恒利, 毛叶飞, 等. 160 W 端面抽运正支混合腔板条激光器的研究 [J]. *物理学报*, 2016, 65(19): 194206.
Yuan J H, Zhang H L, Mao Y F, et al. 160 W laser-diode end-pumped Nd:YVO₄ slab laser with positive branch hybrid resonator [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(19): 194206.
- [6] Guo Y D, Peng Q J, Bo Y, et al. 24.6 kW near diffraction limit quasi-continuous-wave Nd:YAG slab laser based on a stable-unstable hybrid cavity [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1136-1139.
- [7] 许晓军. 高能激光六十年: 回顾与展望 [J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(1): 011007.
Xu X J. Retrospect and prospect on 60-year development of high energy laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(1): 011007.
- [8] Sziklas E A, Siegman A E. Mode calculations in unstable resonators with flowing saturable gain 2: fast Fourier transform method [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(8): 1874-1889.
- [9] Goodman J W. Introduction to Fourier optics [M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [10] 李卿, 刘现魁, 任晓明, 等. 柱面镜旋转对整形光束远场焦斑的影响 [J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1105001.
Li Q, Liu X K, Ren X M, et al. Effect of cylindrical mirror rotation on the far-field spot of a shaping beam [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1105001.
- [11] 袁圣付, 赵伊君, 华卫红, 等. CW DF/HF 化学激光器性能与流场参数的相互关系 [J]. *中国激光*, 2001, 28(5): 402-406.
Yuan S F, Zhao Y J, Hua W H, et al. Dependence of CW DF/HF chemical laser performance on the flow field parameters [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(5): 402-406.
- [12] 杜燕贻. 用薄层处理法模拟有源共焦非稳腔 [J]. *强激光与粒子束*

- 束, 2000, 12(3): 301-305.
- Du Y Y. Simulation of confocal unstable resonators using thin gain sheet[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2000, 12(3): 301-305.
- [13] Morin M. Graded reflectivity mirror unstable laser resonators[J]. Optical and Quantum Electronics, 1997, 29(8): 819-866.
- [14] 周炳坤, 高以智. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 49-56.
- Zhou B K, Gao Y Z. The principle of laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 49-56.
- [15] 高卫, 王云萍, 李斌. 强激光光束质量评价和测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 61-64.
- Gao W, Wang Y P, Li B. Study on characterization and diagnosis of high-power laser beam quality[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1): 61-64.
- [16] 王红岩, 袁圣付, 李强, 等. 电激励连续波 HF/DF 选线化学激光器光轴的选择[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(8): 1257-1260.
- Wang H Y, Yuan S F, Li Q, et al. Choosing cavity axis for a discharge driven CW line-selected HF/DF chemical laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(8): 1257-1260.
- [17] 王杰, 郭建增, 颜飞雪, 等. 氮稀释剂连续波 DF 激光器输出光谱分析[J]. 光子学报, 2018, 47(12): 1214002.
- Wang J, Guo J Z, Yan F X, et al. Analysis of output spectrum in nitrogen diluted continuous wave DF laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(12): 1214002.

Off-Axis Hybrid Unstable Resonator with Z-Fold in Gas Flow Direction

Li Qing^{*}, Liu Xiankui, Ren Xiaoming, Qiu Xiongfei, Li Jinxue, Guo Jianzeng

The 718th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Handan 056027, Hebei, China

Abstract

Objective Hybrid unstable resonators have been widely used in slab solid-state lasers and gas laser systems in recent years due to their high extraction efficiency and high beam quality. So far, hybrid unstable resonators have not been used in DF gas flow chemical laser devices to achieve high-power, high-beam quality mid-infrared continuous wave (CW) laser output. In addition, the beam quality in the direction of stable resonator is always poor and hard to handle, and the physical process of far-field spot from high-order transverse mode oscillation to single fundamental transverse mode oscillation should be studied theoretically and experimentally.

Methods A kind of off-axis hybrid unstable resonator with Z-fold in the flow direction is proposed and studied. The Z-folded off-axis hybrid unstable resonator is a flat concave stable resonator in the gas flow direction, and Z-folded to reduce the gain size in the direction of the stable resonator. In the height direction, it is a positive branch confocal unstable resonator, as shown in Fig. 1. The magnification in the direction of unstable cavity is 1.2. The gain medium is generated by the DF gain generator driven by combustion. Nitrogen is used as diluent, and the static pressure of the gain air flow is generally less than 666.7 Pa. The gain size is about 30 mm in the air flow direction and 40 mm in the height direction, and the gain length of the laser single pass is 125 mm, while after Z-folding the gain length becomes 375 mm. The virtual assembly diagram of the gain generator module and the optical cavity module is shown in Fig. 2. Figure 3 shows the schematic diagram of the monitoring optical path, with which the output power, far-field spot, output spectrum and near-field spot are monitored. We calculate the oscillatory self-reproducing modes of Z-folded off-axis hybrid unstable cavities by means of fast Fourier transform based on the diffraction theory of plane-wave angular spectra. In the calculation, the seed beam used for the optical cavity oscillation is a rectangular parallel plane wave conforming to the cross section of the gain medium (30 mm × 45 mm). There are four mirrors in the optical cavity, and the seed beam oscillates back and forth between the concave spherical mirror 4 and the convex cylindrical mirror 1. After the gain saturation, a self-reproducing mode with stable intensity and phase distribution is formed. The calculation process is shown in Eqs. (1)–(10).

Results and Discussions The mid-infrared CW laser output with average power of 550 W, beam quality β value of 1.8 (the β value is 1.5 in the stable resonator direction and 1.9 in the unstable resonator direction), and spectral coverage of 3680–4089 nm is realized in a miniaturized DF gas flow chemical laser device (size of gain medium: 30 mm × 40 mm × 125 mm), as shown in Figs. 4–6. The calculation results of the far-field spot are shown in Fig. 4. Figures 4(a), 4(b) and 4(c) respectively correspond to the gain size in the direction of the air flow, which is determined by the rectangular apertures in front of the concave spherical mirror 4, being limited to 10 mm, 8 mm, and 6.5 mm. High-order transverse mode oscillations appear in the X direction for the far-field light spots in Figs. 4(a) and 4(b). Figure 5 shows the experimental results of the far-field spots. When the gain size in the air flow direction is limited to 10 mm and 8 mm, the intensity distributions of the near-field spot (10 mm × 6.6 mm, 8 mm × 6.6 mm) and the far-field spot in the experiment have the characteristics of three bright spots and two bright spots, respectively. The bright spot appears as a Hermitian-Gaussian high-order transverse mode, and the beam quality β values of the far-field spots in the air flow direction are 4.2 and 3.4, respectively. As the gain size in the air flow direction is limited to 6.5 mm, we experimentally obtained a high

beam quality CW laser output with a beam quality β value of 1.8, and the beam quality in the air flow direction, i. e., the direction of the stable cavity, is 1.5.

Conclusions In order to achieve high-beam quality and high-power mid-infrared laser output based on a miniaturized DF gain generator (gain volume is 30 mm \times 40 mm \times 125 mm), we propose and study a Z-folded off-axis hybrid unstable resonator in the gas flow direction as the optical resonator of DF chemical laser device, and the beam quality in the gas flow direction of the resonator is studied theoretically and experimentally. Finally, mid-infrared CW laser output with an average power of 550 W, a high beam quality β value of 1.8 (the β value is 1.5 in the stable cavity direction and 1.9 in the unstable resonator direction), and a spectral coverage of 3680–4089 nm is achieved.

Key words lasers; off-axis hybrid unstable resonator; DF gas flow chemical laser; beam quality; mid-infrared laser