

文章编号 2097-1842(2024)05-1068-07

## 内腔式非稳腔 DF 激光光束质量研究

阮鹏<sup>1\*</sup>, 汪玉海<sup>1</sup>, 潘其坤<sup>2</sup>, 邵春雷<sup>2</sup>, 陈飞<sup>2</sup>, 郭劲<sup>2</sup>

(1. 吉林师范大学信息技术学院, 吉林四平 136000;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

**摘要:** 激光光束质量是衡量激光器应用性能的重要指标之一, 面向远距离光电对抗应用场景, 本文开展了非链式脉冲氟化氘 (DF) 激光器非稳腔设计和光束质量提升技术研究。设计了 3 组不同放大倍率的正分支虚共焦非稳腔, 搭建了凸面腔镜横向和轴向两种支撑结构的非稳腔实验装置, 其中横向支撑结构内置循环水冷却通道。以 86.5% 环围能量定义激光光斑大小, 选用  $\beta$  因子评价激光光束质量, 比较两种支撑方式下的输出能量和光束质量。研究发现: 相同条件下, 轴向支撑结构的非稳腔输出能量较横向支撑结构高 6%, 但远场发散角较横向支撑大 9%; 水冷横向支撑结构虽存在部分能量遮挡, 但其较好的热稳定性显著提升了激光光束质量。在  $M=2.25$  的横向支撑内腔式非稳腔条件下获得了光束质量因子  $\beta=1.83$ 、发散角  $\theta_{0.865}=0.63$  mrad 的激光光束。该条件下的激光单脉冲能量为 2.34 J, 激光脉宽为 88.2 ns, 峰值功率达到 26.5 MW。

**关键词:** DF 激光器; 内腔式; 虚共焦非稳腔; 光束质量

中图分类号: TN248.5 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0210

## Study on beam quality of DF laser with inner cavity unstable resonator

RUAN Peng<sup>1\*</sup>, WANG Yu-hai<sup>1</sup>, PAN Qi-kun<sup>2</sup>, SHAO Chun-lei<sup>2</sup>, CHEN Fei<sup>2</sup>, GUO Jin<sup>2</sup>

(1. College of Information Technology, Jilin Normal University, Siping 136000, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: eagle\_laser@163.com

**Abstract:** Laser beam quality is one of the key indicators to measure the application performance of laser. To meet the application requirements of long-distance optoelectronic countermeasures, we carry out the research on the design of unstable resonators and beam quality improvement techniques for non-chain pulsed deuterium fluoride (DF) lasers. Three sets of positive branch virtual confocal unstable resonators with different magnifications are designed. An inner cavity unstable resonator with two support structures of convex mirror, transverse support and longitudinal support, are constructed. The transverse support structure is equipped with a circulating water-cooling channel. Using 86.5% surrounding energy to define laser beam diameter, the

收稿日期: 2023-11-24; 修订日期: 2024-01-09

基金项目: 吉林省自然科学基金项目 (No. 20220101207JC); 激光与物质相互作用国家重点实验室开放基础研究课题 (No. SKLLIM2115)

Supported by the Natural Science Foundation of Jilin Province (No. 20220101207JC); State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter Project (No. SKLLIM2115)

laser beam quality is evaluated with beam quality factor  $\beta$ , and the energy and beam divergence for two support types of convex mirrors are compared. It can be found that, under the same conditions, the laser energy of unstable resonators with longitudinal support is 6% higher than that of the transverse support structure, but the far-field divergence angle is 9% larger than that of the transverse support structure. Although the water-cooled transverse support structure has energy shielding, its good thermal stability significantly improves the quality of the laser beam. Laser beam with a beam quality factor  $\beta$  of 1.83 and a divergence angle  $\theta_{0.865}$  of 0.63 mrad is obtained under the transverse support unstable resonator of  $M=2.25$ . Under this condition, the laser single pulse energy is 2.34 J, the laser pulse width is 88.2 ns, and the peak power reaches 26.5 MW.

**Key words:** DF laser; inner cavity; positive branch confocal unstable resonator; beam quality

## 1 引言

3~5  $\mu\text{m}$  中红外激光器的输出波段处于大气传输窗口,在大气监测、激光通信、激光光谱学、医疗、军事等众多领域均有广泛应用<sup>[1-8]</sup>。中心波长为 3.8  $\mu\text{m}$  的电引发非链式脉冲 DF 激光器相较于中红外链式 DF 激光器,兼具脉冲能量和峰值功率优势,且具有结构紧凑、操作简单、易于实现小型化和工程化等优点,因而自其诞生起,一直受到国内外激光技术领域研究者的广泛关注<sup>[8-13]</sup>。俄罗斯普通物理所的 Tarasenko 研究团队通过优化气体组分、比输入能量及改善放电均匀性,最终获得 6.4% 的电光转换效率。这是目前报道的电引发非链式 DF 激光器的最大电效率<sup>[14]</sup>。同样来自俄罗斯普通物理所的 Firsov 研究团队发明了自引发体放电方法,并在  $\text{SF}_6\text{-D}_2$  气体中获得了最大能量为 325 J 的单脉冲非链式 DF 激光输出<sup>[15]</sup>。俄罗斯联邦核中心的 Velikanov 团队通过改进风机结构,使放电区最大风速超过 30 m/s,并在  $\text{SF}_6\text{-D}_2$  工作气体中加入 He 气以提高放电稳定性,最终获得重频为 2200 Hz、平均功率为 33 W 的高重频 DF 激光输出<sup>[16]</sup>。

国内对电引发非链式 DF 激光器的研究起步较晚,且受限于放电引发技术,目前获得的功率及能量水平均远低于国外。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称长春光机所)、西北核技术研究所等研究单位数十年来一直致力于提高电引发非链式 HF/DF 激光器的输出性能<sup>[17-20]</sup>。2012 年,阮鹏<sup>[19]</sup>等通过优化气体参数和输出镜参数,采用紫外预电离放电引发方式,最终获得了 4.95 J 的单脉冲能量。2016 年, PAN Q K<sup>[12]</sup>等通

过改进放电技术,以闸流管代替旋转火花开关,并使用自引发放电技术,最终在 1.65 L 的放电体积下获得重复频率为 50 Hz、平均功率为 150 W 的非链式 DF 激光输出。黄超<sup>[20]</sup>等人通过深入研究放电稳定性、吸附条件、流道风速等参数对重频 HF 激光器输出性能的影响,最终实现了重复频率为 150 Hz、平均功率为 200 W 的 HF 激光输出。

在实现非链式 HF/DF 激光器高能量高功率稳定输出以后,科研人员又将目光转向其光束质量提升技术上。俄罗斯的 Apollonov 研究团队采用放大倍率  $M=3$  的望远镜非稳腔,获得了 4 倍衍射极限  $\theta_{0.5}=0.29$  mrad 的激光光束<sup>[21]</sup>。国内,西北核技术研究所朱峰<sup>[18]</sup>等人对非链式 HF 激光光束质量进行了研究,采用  $M=2.5$  的非稳腔获得了 2.3 倍衍射极限  $\theta=0.78$  mrad 的激光输出。长春光机所的谭改娟<sup>[22]</sup>等采用刀口法进行非稳腔 DF 激光光束质量研究,在  $M=1.89$  条件下获得 1.35 倍衍射极限  $\theta_{0.865}=0.74$  mrad 激光光束。

以上非链式 HF/DF 激光器光束质量研究中的非稳腔均采用布儒斯特窗密封、腔镜外置的外腔方式。该方式下光轴的横向平移会导致谐振腔装调难度大,而且谐振腔的失调对光束质量影响非常明显,且光束质量受外界震动影响大。针对上述问题,本文采用腔镜密封储气腔的内腔式非稳腔结构,腔镜和气体腔形成整体,既降低了成本又提高了系统的整体稳定性。设计了 3 组不同参数的腔镜组合,以光束质量因子  $\beta$  作为评价标准,采用小孔光阑法对谐振腔凸镜横向和轴向支撑两种不同安装方式下的 DF 激光器光束质量进行实验研究,寻求获得最佳光束质量的凸镜安装方式和腔镜参数。

## 2 非稳腔参数设计

本文选取能够实现近平行光输出且腔内无实焦点的正分支虚共焦非稳腔进行电引发非链式 DF 激光器光束质量研究, 其原理图如图 1 所示。

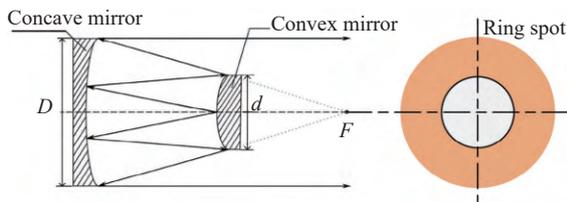


图 1 正分支虚共焦非稳腔原理图

Fig. 1 Schematic diagram of positive branch virtual confocal unstable resonator

正分支虚共焦非稳腔的两个球面反射镜焦点在轴上重合, 并位于谐振腔外, 理想状态下, 其输出光束近似为平行光。放大率  $M$  是表征非稳腔性能的重要参数。它代表了谐振腔对光束单次往返的放大能力。放大率  $M$  与谐振腔结构参数的关系如下:

$$M = g_2/g_1 = R_1/R_2 \quad (g_i = 1 - L/R_i) \quad (1)$$

式中,  $L$  为腔长,  $R_i$  为球面镜的曲率半径。当凹面反射镜的曲率半径  $R_1$  大于凸面反射镜的曲率半径  $R_2$  时, 凹镜的有效口径最小值  $D$  与凸镜口径  $d$  之间满足  $D=Md$ 。最终从凸面反射镜边缘输出内外径分别为  $d$  和  $D$  的环状光束。

为了提升光束质量, 凹面镜的有效口径  $D$  不能大于电极间距, 以避免激光在四角增益区串扰放大的风险。实验所用电引发非链式 DF 激光器的放电间距为 5 cm, 因而选取  $D=5$  cm。根据放大率  $M$  与谐振腔结构参数的关系(式(1)), 设计出  $M$  分别为 1.65、1.85、2.25 的 3 组不同放大率的非稳腔, 设计参数见表 1。

表 1 3 种不同放大率的正分支非虚共焦非稳腔结构参数  
Tab. 1 Structural parameters of three sets of positive branch virtual confocal unstable resonator with different magnifications

$M$	$R_1/\text{mm}$	$R_2/\text{mm}$	$D/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$L/\text{mm}$
1.65	10727.5	-6501.5	50	30.2	2113
1.85	9197.8	-4971.9	50	26.9	2113
2.25	7606.8	-3380.8	50	22.2	2113

虚共焦非稳腔的远场光强分布可根据 Fraunhofer 衍射理论计算得到, 即:

$$I(\theta) = \left\{ \frac{M^2}{(M^2 - 1)} \left[ \frac{2J_1(ka\theta)}{ka\theta} - \frac{2J_1(ka\theta/M)}{Mka\theta} \right] \right\}^2 I_0 \quad (2)$$

式中,  $a$  为圆环外径,  $\theta$  为远场发散角半角,  $M$  为放大率,  $k$  为波数,  $J_1$  为一阶贝塞尔函数,  $I_0$  为远场衍射光斑的中心强度。对  $\theta$  进行积分, 便可得到远场光斑的能量分布:

$$E(\theta) = \int_0^\theta \theta \cdot I(\theta) d\theta \quad (3)$$

定义环围能量为远场光斑总能量 86.5% 的光斑所对应的光束发散角为远场发散角, 即:

$$\frac{\int_0^{\theta_{\text{diff}}} \theta \cdot I(\theta) d\theta}{\int_0^\infty \theta \cdot I(\theta) d\theta} = 86.5\% \quad (4)$$

将  $M$ 、 $a$  的数值带入上式, 便可计算得到不同放大率所对应的远场发散角的理论值, 如表 2 所示。

表 2 不同放大率下的理论发散角

$M$	1.65	1.85	2.25
$\theta/\text{mrad}$	0.4931	0.4544	0.3451

选取能够体现远场能量集中度以及实际光束与理想光束偏移程度的光束质量因子  $\beta$  作为非稳腔光束性能的评价指标。  $\beta$  因子的定义如下:

$$\beta = \frac{\theta_r}{\theta_c} \quad (5)$$

式中,  $\theta_r$  和  $\theta_c$  分别表示以 86.5% 环围能量比定义的实际光束和理想光束的远场发散角。  $\beta$  因子的大小反映了实际出射光束的远场发散情况,  $\beta$  越小发散越小, 光束质量越好。

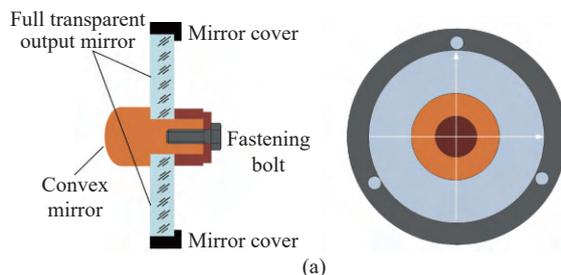
## 3 光束性能测量与分析

### 3.1 实验装置

本文搭建的非链式脉冲 DF 激光器非稳腔实验装置如图 2 所示。激光器采取放电引发方式, 放电电极为上下对称的平板电极, 放电区尺寸为

65 cm×5 cm×5 cm。采用与储气腔连在一体 的内腔式谐振腔结构,后腔镜为铜镀金凹面反射镜,反射率为 99%,前腔镜为铜镀金凸面反射镜,镶嵌在平面输出镜上,反射率为 99%。光束在两个反射镜间往返振荡,最终从凸面镜外围输出环状光斑。从输出窗口出射的环状激光经分束镜分为两束,一束用于激光近场能量和脉冲波形测量,另一束光束进入发散角测量系统用于测量远场光束发散角。光束发散角测量系统由焦距  $f=4.6$  m 的聚焦反射镜、可调孔径光阑和能量计组成。聚焦反射镜置于距激光输出口 5.5 m 位置处,其与输出光轴的夹角小于  $20^\circ$ 。孔径光阑位于聚焦镜焦点处,其后放置能量计 2。调节孔径光阑大小,记录不同孔径下的能量大小,以 86.5% 环围能量定义远场光斑直径  $D$ ,则远场发散角为  $D/f$ 。

凸镜可采用横向支撑和轴向支撑两种方式固定在输出镜上。图 3 为两种凸镜安装结构示意图。轴向支撑采用无支撑杆的安装方式,以中心开孔的增透 ZnSe 窗口镜作为安装基座,凸全反镜



尾杆轴向穿过窗口镜中心孔,并通过螺纹进行轴向紧固连接,如图 3(a)所示。横向支撑结构采用内径大于光束直径的环形座通过径向支杆进行支撑连接,如图 3(b)所示。径向支撑杆中空,可通水对凸全反镜进行冷却。为了减小后腔镜热效应对光束质量的影响,凹面反射镜采用常规的镜体内开水冷通道、背面通冷却水的方式进行水冷。激光器实验条件如下:  $SF_6:D_2=8:1$ ,绝对腔压  $P=9$  kPa,工作电压为 39 kV。

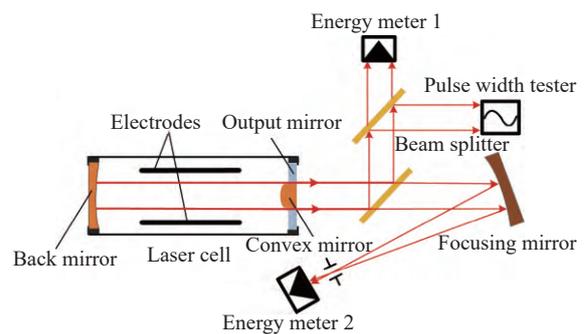


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

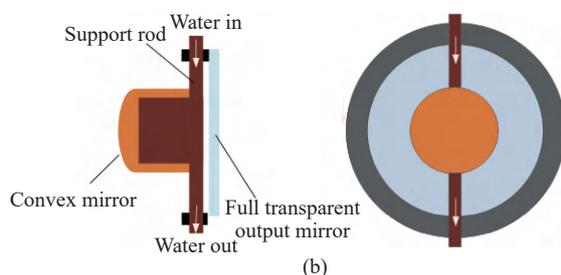


图 3 凸镜安装结构示意图。(a)轴向支撑结构;(b)横向支撑结构

Fig. 3 Schematic diagram of convex mirror installation structure. (a) Longitudinal support structure; (b) transverse support structure

### 3.2 实验结果与分析

图 4(彩图见期刊电子版)所示为两种安装方式下不同  $M$  值下的近场激光能量情况。可以看出,两种安装方式下激光能量均呈先增大后减小的趋势,均在  $M=1.85$  时取得近场能量最大值。当激光器处于相同工作条件下,激光单脉冲能量只与谐振腔结构有关。对于腔长及反射率都相同的 3 组不同放大率的谐振腔,损耗因素相同,激光输出能量与激光增益和输出耦合率有关。增益越大,输出耦合率越高,则激光能量也越高。由于输出耦合率  $C=1-1/M^2$ ,其与  $M$  值成正比,而增益体积与  $M$  值成反比,故激光能量随  $M$  值不是单一

线性变化的。在相同充电电压下,放电增益相同,低  $M$  值时有效耦合输出较低,部分激光能量由于受凸镜遮挡无法输出腔外,导致使能量较低;而高  $M$  值时光束在谐振腔内的有效振荡次数减少,即有效增益体积减小致使输出能量下降。 $M=1.85$  时,增益体积和输出耦合率达到最佳,最大单脉冲能量达到 2.73 J。

从图 4 还可看出,同一  $M$  值下横向支撑结构的近场能量低于轴向支撑,能量下降量约为 6%。这是因为横向支撑结构由于径向支杆处于输出光路中,对激光束有所遮挡,从而引起激光能量下降。

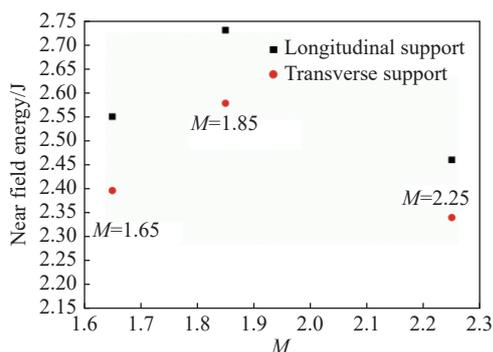


图 4 两种支撑结构下的激光近场能量对比图

Fig. 4 Near field laser energy under two types of supporting structures

采用烧蚀光斑法在热敏纸上获得了非稳腔近场光斑, 图 5 为  $M=1.85$  时距离激光出射口 1.5 m 位置处两种支撑结构的近场光斑图。

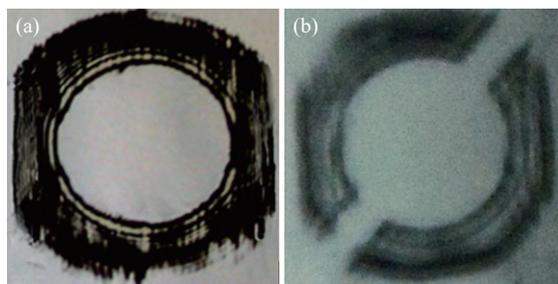


图 5 激光近场光斑照片。(a)轴向支撑结构光斑;(b)横向支撑结构光斑

Fig. 5 Near field laser spots for (a) longitudinal support structure and (b) transverse support structure

由图 5 可明显看出, 横向支撑结构的近场光斑出现了与支杆安装方位一致的缺口, 在近场光斑缺口边缘处可见清晰的单缝衍射条纹。在两种情况下, 近场光斑水平方向宽度均略小于竖直方向宽度。这是由于水平方向放置的电极对光束存在衍射作用, 使得水平方向光束边缘不再是圆形。测量得到的近场光斑内径尺寸与凸镜一致, 但外径均小于后反镜的有效口径。其原因在于放电区边缘存在非完全放电的等离子体, 其对激光束的屏蔽作用使得近场光斑的有效孔径小于后反镜的有效口径。激光器电极间距为 50 mm, 近场光斑水平和竖直方向尺寸为 46 mm×47 mm, 即光斑大小约为增益横截面的 87%。考虑电极表面衍射作用和放电区边缘不完全放电对激光的屏蔽作用, 后反镜的有效口径应小于放电间距的 87%。

图 6(彩图见期刊电子版)给出了两种支撑结构下理论发散角与实验发散角随放大率  $M$  的变

化关系。实验得到的远场发散角随  $M$  的变化规律与理论计算结果相符。在放大倍率  $M$  由 1.65 增加到 2.25 的过程中, 发散角逐渐减小, 激光光束质量逐渐提高。横向和轴向两种支撑结构均在  $M=2.25$  时取得最小发散角, 其值分别为 0.69 mrad 和 0.63 mrad。根据光束质量评价因子  $\beta$  的定义, 计算得到光束质量因子数值, 如表 3 所示。

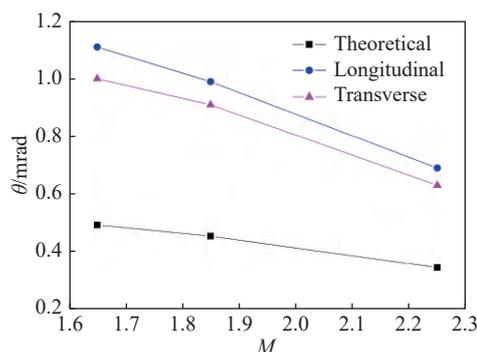


图 6 不同放大倍率下的远场光束发散角

Fig. 6 Far field divergence angles under different magnifications

表 3 不同放大倍率下光束质量因子  $\beta$  数据Tab. 3 Beam quality factor  $\beta$  data

$M$	$\beta$	
	Transverse support	Longitudinal support
1.65	2.05	2.25
1.85	1.98	2.18
2.25	1.83	2.00

由表 3 可知, 在  $M$  值增加的过程中, 光束质量因子  $\beta$  与发散角的变化趋势一致, 均随放大率增加呈下降趋势。在同一  $M$  值下, 横向支撑结构的  $\beta$  因子和发散角均低于轴向支撑结构, 发散角降低约 9%。横向支撑光束质量优于轴向支撑的主要原因是: 前者具有的径向支撑杆水冷结构, 有效改善了热温升导致的凸镜的面型畸变; 高压放电和化学反应释能可将 DF 激光增益介质加热至数百摄氏度; 内腔式凸镜直接与增益介质接触, 其热温升能量主要来源于高温增益介质的热辐射和热对流。此外, 在激光器单脉冲运行个数较多, 或者脉冲重复频率运转条件下, 横向支撑的凸镜面型稳定, 改善了光束质量, 而轴向支撑凸镜面型热畸变是其光束质量下降的核心因素。

采用光电探测器对  $M=2.25$  的横向支撑结构

输出激光进行激光脉冲波形测量,结果如图7所示。激光脉宽为88.2 ns,激光出口处测得的单脉冲能量为2.34 J,则激光峰值功率达26.5 MW,预估10 km处的能量密度为75 mJ/m<sup>2</sup>。

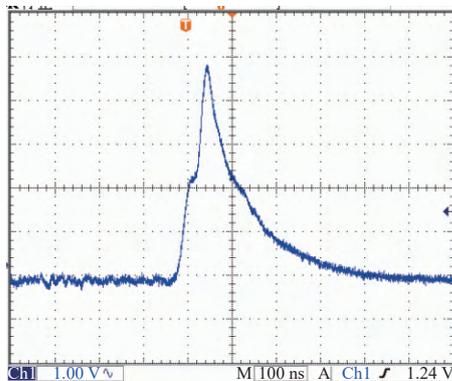


图7 非稳腔脉宽

Fig. 7 Pulse width of unstable resonator

由于非稳腔具有更高的损耗系数,在相同放电激励条件下,其激光脉冲建立时间较稳腔更长,脉冲波形更陡峭,激光脉宽也更窄。激光脉宽相比稳腔(脉宽150 ns)压缩了40%<sup>[19]</sup>,而发散角仅为稳腔(7.15 mrad)的9.23%<sup>[22]</sup>。由此可知,采用横向支撑结构的非稳腔使激光器的光束质量得到了极大的提高。虽然目前实验得到的非稳腔发散

角比稳腔小很多,但仍比理论值要大,其原因主要有:理论计算以平行光环孔衍射为依据,而实际光束是具有一定发散度的非平行光;透镜曲率、口径等加工误差,腔镜、电极等装调误差,支撑杆、电极边缘的衍射作用等都会造成实际发散角大于理论发散角。

由于脉冲能量随 $M$ 值的增大而下降,下一步可以考虑在能量允许范围内进一步提高放大率,探索使光束发散角达到衍射极限的放大率参数和谐振腔结构参数。

## 4 结 论

本文采用内腔式非稳腔结构进行了非链式DF激光器光束质量研究。设计了3组具有不同放大率的正分支虚共焦非稳腔,对横向支撑和轴向支撑两种安装方式下的输出性能进行了对比研究。实验结果表明:横向支撑中内置的水冷循环使得凸镜面型更加稳定,从而光束质量优于轴向支撑结构。最终在 $M=2.25$ 的横向支撑结构非稳腔中获得发散角为0.63 mrad、光束质量因子 $\beta=1.83$ 的高质量非链式DF激光输出,发散角仅为稳腔的9.23%。

## 参考文献:

- [1] KLINGBEIL A E, JEFFRIES J B, HANSON R K. Tunable mid-IR laser absorption sensor for time-resolved hydrocarbon fuel measurements[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 807-815.
- [2] KLOSNER M, WU C, HELLER D F. Mid-IR Laser system for advanced neurosurgery[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8928: 89280D.
- [3] STARECKI F, CHARPENTIER F, DOUALAN J L, et al.. Mid-IR optical sensor for CO<sub>2</sub> detection based on fluorescence absorbance of Dy<sup>3+</sup>: Ga<sub>5</sub>Ge<sub>20</sub>Sb<sub>10</sub>S<sub>65</sub> fibers[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 207: 518-525.
- [4] PHAL Y, YEH K, BHARGAVA R. Mid-IR laser-based polarimetric imaging for polymeric and biological applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11656: 1165619.
- [5] FROLOV Y N, VELIKANOV S D, LAZARENKO V I, et al.. Remote laser analyzer for methane sensing in the air of subterranean spaces[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4722: 140-144.
- [6] TÖPFER T, PETROV K P, MINE Y, et al.. Room-temperature mid-infrared laser sensor for trace gas detection[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(30): 8042-8049.
- [7] VASIL'EV B I, MANNOUN O. IR differential-absorption lidars for ecological monitoring of the environment[J]. *Quantum Electronics*, 2006, 36(9): 801-820.
- [8] VELIKANOV S D, ELUTIN A S, KUDRYASHOV E A, et al.. Use of a DF laser in the analysis of atmospheric hydrocarbons[J]. *Quantum Electronics*, 1997, 27(3): 273-276.
- [9] BRUNET H, MABRU M, VANNIER C. Improved DF performance of a repetitively pulsed HF/DF laser using a deuterated compound[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3092: 494-497.
- [10] SERAFETINIDES A A, RICKWOOD K R, PAPAPOPOULOS A D. Performance studies of a novel design atmospheric pressure pulsed HF/DF laser[J]. *Applied Physics B*, 1991, 52(1): 46-54.

- [11] IGNAT'EV A B, KAZANTSEV S Y, KONONOV I G, *et al.*. On the possibility of controlling the wave front of a wide-aperture HF(DF) laser by the method of Talbot interferometry[J]. *Quantum Electronics*, 2008, 38(1): 69-72.
- [12] PAN Q K, XIE J J, WANG CH R, *et al.*. Non-chain pulsed DF laser with an average power of the order of 100 W[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(7): 200.
- [13] 顾文珊, 梁小溪, 李红超, 等. 小型化轴流式非链式脉冲氟化氙激光器[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(1): 20200082. GU W SH, LIANG X X, LI H CH, *et al.*. Miniaturized axial flow non-chain pulsed deuterium fluoride laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(1): 20200082. (in Chinese).
- [14] TARASENKO V F, PANCHENKO A N. Efficient discharge-pumped non-chain HF and DF lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6101: 61011P.
- [15] APOLLONOV V V, KAZANTSEV S Y, SAIFULIN A V, *et al.*. Discharge characteristics in a Nonchain HF(DF) laser[J]. *Quantum Electronics*, 2000, 30(6): 483-485.
- [16] VELIKANOV S D, EVDOKIMOV P A, ZAPOL'SKY A F, *et al.*. Pulse periodic HF (DF)-laser of atmospheric pressure with pulse repetition rate up to 2200 Hz[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7131: 71310V.
- [17] 易爱平, 刘晶儒, 唐影, 等. 放电激励重复频率非链式 HF 激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(7): 1763-1766. YI A P, LIU J R, TANG Y, *et al.*. Discharge pumped repetition- rate non- chain HF laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7): 1763-1766. (in Chinese).
- [18] 朱峰, 黄珂, 周松青, 等. 基于非稳腔的非链式脉冲 HF 激光光束质量优化[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0401002. ZHU F, HUANG K, ZHOU S Q, *et al.*. Laser beam quality optimization of no-chain pulsed HF laser using unstable resonator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0401002. (in Chinese).
- [19] 阮鹏, 谢冀江, 张来明, 等. 非链式脉冲氟化氙激光器的动力学模拟和实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0702002. RUAN P, XIE J J, ZHANG L M, *et al.*. Dynamical simulation and experimental study of non-chain pulsed DF laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 0702002. (in Chinese).
- [20] 黄超, 黄珂, 易爱平, 等. 200 W 重复频率中红外氟化氢化学激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0801005. HUANG CH, HUANG K, YI A P, *et al.*. 200 W Mid-infrared HF chemical laser with repetition rate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0801005. (in Chinese).
- [21] APOLLONOV V V, BELEVTSSEV A A, FIRSOV K N, *et al.*. Advanced studies on powerful wide-aperture nonchain HF(DF) lasers with a self-sustained volume discharge to initiate chemical reaction[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5120: 529-541.
- [22] 谭改娟, 谢冀江, 潘其坤, 等. 非链式脉冲 DF 激光器非稳腔设计与实验研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0102004. TANG G J, XIE J J, PAN Q K, *et al.*. Design and experimental investigation on unstable resonator for non-chain pulsed DF laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 0102004. (in Chinese).

#### 作者简介:



阮鹏(1985—),女,湖北宜昌人,博士,讲师,硕士生导师,2009年于东北林业大学获得学士学位,2014年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位。主要从事中红外激光技术及理论研究。E-mail: eagle\_laser@163.com