

基于非稳腔的非链式脉冲 HF 激光光束质量优化

朱 峰, 黄 珂, 周松青, 栾昆鹏, 沈炎龙, 易爱平, 李高鹏

西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 采用正支虚共焦非稳腔对非链式脉冲 HF 激光谐振腔进行了优化, 提高了激光光束质量。采用不同放大倍率和不同模体直径, 设计了 5 种不同参数的激光谐振腔。利用聚焦法测量了焦面远场光斑, 采用衍射极限倍数法分析了激光光束质量变化规律, 比较了不同腔参数激光脉冲能量的变化规律。实验结果表明, 非稳腔放大倍率大于 2.5 倍情况下, 可以得到约 2.3 倍衍射极限的激光输出。为了得到较好的实验结果, 在实验所用的放电电极结构下, 激光模体直径控制在增益区截面直径的 80% 以内情况下得到的光束质量较好。

关键词 激光器; HF 激光器; 非稳腔; 光束质量; 衍射极限倍数

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0401002

Laser Beam Quality Optimization of No-Chain Pulsed HF Laser Using Unstable Resonator

Zhu Feng, Huang Ke, Zhou Songqing, Luan Kunpeng, Shen Yanlong,
Yi Aiping, Li Gaopeng

*State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of
Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China*

Abstract The beam quality of no-chain pulsed HF laser cavity is improved by optimizing a positive branch confocal unstable resonator. Cavity structures of five different parameters are designed with different cavity magnifications and laser mode volume diameters. The effect of different cavity structure parameters on laser beam quality and laser pulse energy are studied by using the diffraction limit magnification based on the measuring of the focusing spots. The experimental result shows that diffraction limit magnification of 2.3 can be reached with the cavity magnification larger than 2.5. In order to get a better experimental result, the optimum diameter of mode volume is controlled within 80% of the gain cross section, and a better laser beam quality is obtained under the discharge electrode structure in the experiment.

Key words lasers; HF laser; unstable resonator; beam quality; diffraction limit magnification

OCIS codes 140.3410; 140.3460; 140.3300

1 引 言

HF 激光辐射波段在 $2.6\sim 3.0\ \mu\text{m}$, 是中红外重要的激光光源, 辐射波段处于众多分子的吸收峰, 可用于激光化学、激光光谱学、激光医疗等领域。脉冲 HF 激光器的研究始于 20 世纪 60 年代, Deutsch^[1] 采用纵向放电结构首次获得单脉冲的 HF 激光输出。在随后的时间里, 法国、俄罗斯等国家开展了大量研究工作, 研究重点主要围绕放电结构和激光工作介质展开, 激光脉冲能量由最初的毫焦量级逐渐提高到百焦耳量级, 关注的焦点在于提高激光器脉冲能量、峰值功率和激光器效率方面^[2-7], 多采用具有较大模体体积的稳定腔和介稳腔, 对于激光光束质量的关注较少, 而激光光束质量是激光器的一项重要指标, 关系到激光的传输效率, 是一项不可或缺的内容。在这方面的研究中, Appollov 等^[8] 采用放大率为 3 的非稳腔, 获得 4 倍衍射极限的输出。Brunet 等^[9] 的研究结果表明, 采用非稳腔激光输出能量略低于稳定腔。国内中国科学院电子学研

收稿日期: 2016-10-25; 收到修改稿日期: 2016-12-05

作者简介: 朱 峰(1983—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: wysg010@163.com

究所在脉冲放电 HF 激光器上取得了一定的研究成果,但是对于非稳腔的研究未见报道^[10-11]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在脉冲放电激励 DF 激光器^[12]和 CO₂ 激光器^[13]上进行了研究,在脉冲放电激励 DF 激光器上获得 1.35 倍衍射极限的输出,但是,针对放电激励非链式脉冲 HF 激光器的非稳腔研究尚未见报道。

本文将基于实验室现有的脉冲放电 HF 激光器,利用非稳腔对激光光束质量进行优化。针对现有的激光器的放电几何尺寸,设计加工不同种类结构的谐振腔,通过对比寻找适用于现有的激光器放电结构的谐振腔参数。

2 基本原理

非稳腔可以分为正支和负支两种类型,负支非稳腔因其在腔内有实心焦点而应尽量避免用于高功率激光器。图 1 为正支虚共焦非稳腔示意图,图中凸面镜为次镜,凹面镜为主镜,谐振腔输出激光为近似平行光,光斑为环状。依据谐振腔理论,正支虚共焦非稳腔腔参数具有以下关系,即

$$R_1 = \frac{-2L}{M-1}, \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{2ML}{M-1}, \quad (2)$$

式中 R_1 为次镜曲率半径, R_2 为主镜曲率半径, L 为谐振腔腔长, M 为谐振腔放大倍数。实验选取了 5 种放大倍率,2 种模体积的非稳腔,放大率为 1.5,2,2.5 采用的模体积直径为 10 mm,放大率为 3 和 3.6 采用的模体积直径为 12 mm,谐振腔结构参数见表 1。

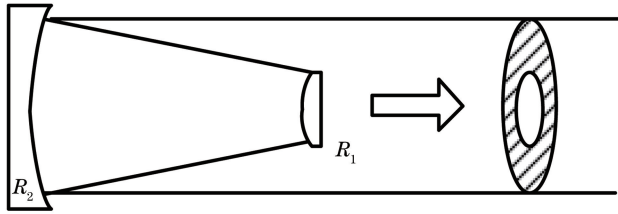


图 1 正支虚共焦非稳腔示意图

Fig. 1 Positive branch confocal unstable resonator

表 1 谐振腔设计参数

Table 1 Structure parameters of laser cavity

M	Φ_1 /mm	R_1 /mm	R_2 /mm	L /mm
1.5	6.7	-3600	5400	900
2	5	-1800	3600	900
2.5	4	-1200	3000	900
3	4	-1000	3000	1000
3.6	4	-1000	3600	1300

对于无源腔,根据非稳腔腔参数特点,激光出口得到近似平行光的环形光束。利用平面波经环形光阑遮挡所形成夫琅和费衍射场可以得到环形光斑远场光强分布 $I(\Phi)$ ^[14]。通过对无源腔光强分布的分析可以知道,提高谐振腔放大率可以提高激光光束质量。

对于有源腔,依据增益介质的持续时间,激光输出形式可以分为连续和脉冲两种。非稳腔在化学激光器上已有较多的应用,相对于放电激励的脉冲激光器,化学激光器出光时间较长,可以认为是连续输出,激光能量提取过程中增益介质的形成和维持近似是一个稳态过程;与化学连续激光器不同,实验室脉冲 HF 激光持续时间为百纳秒,激光能量提取过程中增益介质的形成受瞬态放电过程影响,是一个动态变化的过程。此外,连续和脉冲激光器增益介质的形成方式和增益系数大小也存在一定差异,谐振腔参数设计同样需要进行相应调整。

3 实验结果与讨论

利用实验室项目组自研制的放电激励非链式 HF 激光器,激光器结构参数见文献[7]和[8],激光器放电区截面积 $10\text{ mm} \times 17\text{ mm}$ 。激光器气室采用 10° 的斜窗进行密封,窗口材料为 CaF_2 玻璃。谐振腔采用正支虚共焦非稳腔设计,如图 2 所示,光学谐振腔由一对口径分别为 Φ_1 和 Φ_2 的次镜和主镜构成,对应的曲率半径分别为 R_1 和 R_2 ,谐振腔腔长为 L ,主镜和次镜表面镀有全反介质膜,激光沿着光轴方向输出。在激光输出端,距离次镜约 20 cm 处放置一个焦距为 2 m 透镜,在焦平面获得激光远场光斑,并分析激光光束质量变化情况。

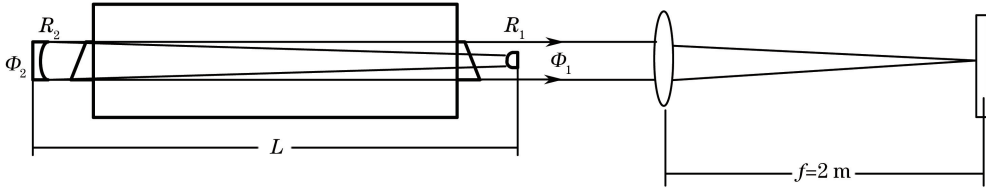


图 2 非稳腔实验示意图

Fig. 2 Schematic of the unstable resonator experiment

3.1 谐振腔放大倍率的影响

在实际远距离传输应用中,不仅要求激光有高能量,还要求激光在远场目标上的半径小,具有较高的能量密度,即具有较高的光束质量。常用的光束质量评价参数主要有聚焦光斑尺寸、远场发散角半角宽 θ 、衍射极限倍数 β 、环围能量比以及 M^2 因子等。而衍射极限倍数 β 是评价激光能量传输性能的常用指标,能够较合理地评价光束质量,反映实际激光束能量传输效率^[14-15],其定义为 $\beta = \theta_{\text{real}} / \theta_{\text{ideal}}$,其中 $\theta_{\text{real}} = a / f$ 是实际光束的远场发散角, a 为实测远场光斑半径, f 为透镜焦距, $\theta_{\text{ideal}} = C\lambda / D$ 是理想光束的远场发散角, C 为归一化零级衍射光斑半径,其取值与输出环形激光的遮拦比有关(接近于 1,这里近似取为 1), D 为激光器输出口处光斑直径, λ 为 HF 激光波长(取为 $2.7\ \mu\text{m}$)。由定义可知,衍射极限倍数 β 反映了实际光束相对理想光束的偏差, β 越接近 1 说明实际光束质量越好。图 3 给出了不同放大倍率情况下实际焦平面得到的激光远场光斑,由左到右放大率 M 分别为 1.5, 2, 2.5。从图中可以看出,焦平面激光远场光斑随着谐振腔放大率 M 的增大而略有减小,激光能量有向中心会聚的趋势,光束质量变好。

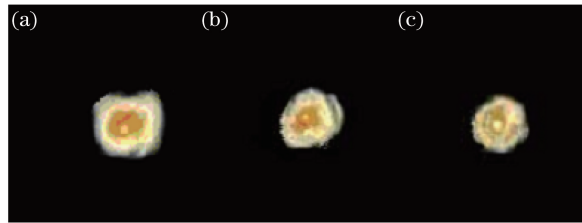


图 3 焦平面获得的激光远场光斑。(a) $M=1.5$; (b) $M=2$; (c) $M=2.5$

Fig. 3 Far field spot of focal plane. (a) $M=1.5$; (b) $M=2$; (c) $M=2.5$

通过测量焦平面光斑大小,可以计算得到激光衍射极限倍数,表 2 给出了不同放大倍率 M 对应的激光焦斑半径 a 、发散角半角宽 θ 以及衍射极限倍数 β 变化情况。从表中可以看出,在实验所采用的放大倍率范围内,激光衍射极限倍数均小于 3,在放大倍率为 2.5 的条件下,激光发散角半角最小,为 0.78 mrad ,衍射极限倍数最小为 2.35 倍。与以往稳定腔相比,焦面光斑大小约为 $4\text{ mm} \times 6\text{ mm}$,在 x 轴和 y 轴两个方向分别为 3.7 倍和 9.4 倍衍射极限,光束质量得到一定的提高。

表 2 光束远场发散角和衍射极限倍数

Table 2 Far field divergence angle and diffraction limit magnification

M	a / mm	θ / mrad	β
1.5	3.5	0.88	2.66
2.0	3.3	0.83	2.50
2.5	3.1	0.78	2.35

实验测量得到的激光远场光斑比理论值大,分析认为是受到激光器放大自发辐射的影响。激光器电极间距为 17 mm,按照前述非稳腔设计尺寸,有效模体积直径为 10 mm,小于激光器电极间距。激光形成过程中,仅提取了放电增益区靠近腔轴中间部分的能量。剩余部分增益介质会形成自发放大辐射输出腔外,影响到测量的焦斑大小。另外一个原因在于调控精度的影响,理想的正支共焦非稳腔输出平行光,但是由于人工调控精度与理想的腔参数存在匹配误差,也会影响测量得到的焦斑大小,降低激光光束质量。

上述实验中,激光沿着轴向输出,由于次镜需要镜架固定,激光光斑被镜架少部分遮挡,为了提高激光能量输出效率,后期实验采用刮刀镜,将激光横向耦合输出腔外,得到无遮挡的环形光斑。图 4 给出了不同放大倍率对衍射极限倍数的影响,在放大倍率 M 由 1.5 增加到 2.5 的过程中,衍射极限倍数 β 逐渐减小,激光光束质量逐渐提高,在 M 由 2.5 提高到 3.6 的过程中, β 变化不明显,光束质量提高不明显。所以为了得到较好的光束质量,谐振腔放大倍率需要提高到 2.5 以上。

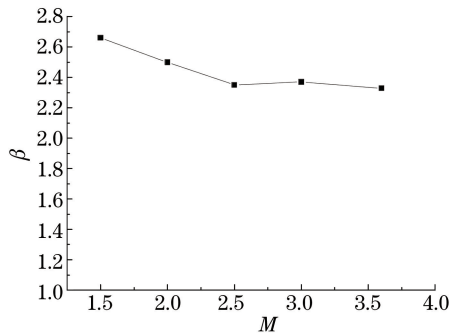


图 4 不同放大倍率下光束质量

Fig. 4 Beam quality under different magnifications

在 $M=3.0$ 和 $M=3.6$ 的情况下,光束质量没有明显提高,分析认为是由调控误差和电极衍射造成的。图 5 给出了不同模体积条件下的激光近场光斑,从图中可以看出,激光模体积直径为 10 mm 时,模体积约占放电增益区体积的 59%,近场光斑近似为一个亮度均匀的圆环。模体积直径为 12 mm 时,模体积约占增益区体积的 71%,近场光斑同样为一个圆环,但是受到电极表面衍射的影响,圆环上部可见强度微弱的条状衍射条纹,这种情况在模体积直径为 14 mm 时更为明显,此时模体积约占增益区体积的 82%,圆环顶部衍射条纹清晰可见,同时圆环两侧由于模体积直径超出放电区有效增益截面,左右两侧的激光强度减弱。所以模体积直径为 10 mm 情况下,激光近场光斑质量较好,12 mm 次之,在 14 mm 条件下,由于受到电极表面衍射和放电有效增益截面的限制,近场光斑均匀性受到影响,影响了激光光束质量的进一步提高,图中衍射条纹只在近场光斑上方出现,说明谐振腔腔轴略微偏离中心,靠近上方条形电极的表面,造成电极对激光的较强衍射。激光器的电极长为条形平行电极,装校有一定难度。由于存在电极平行度装校误差、谐振腔光轴定位误差以及谐振腔调控误差,所以最佳增益体积应该控制在放电增益体积的 80%左右(取略小于 82%的值)。

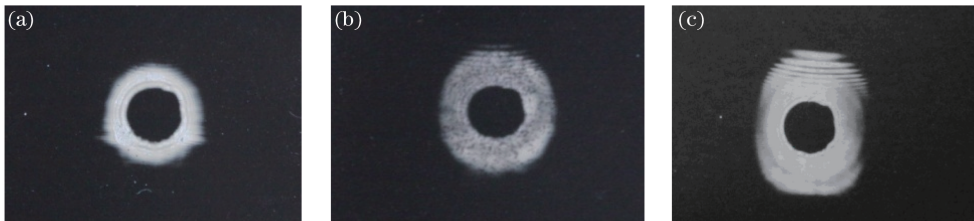


图 5 不同模体积条件下的激光近场光斑。(a) $a=10$ mm;(b) $a=12$ mm;(c) $a=14$ mm

Fig. 5 Near-field spots under different laser mode volumes. (a) $a=10$ mm; (b) $a=12$ mm; (c) $a=14$ mm

3.2 放电激励的影响

不同的充电电压对应着不同的放电激励条件,图 6 给出了不同充电电压条件下,谐振腔放大倍率对激光输出能量的影响(激光模体积直径为 10 mm),在充电电压为 25 kV 的条件下,随着谐振腔放大倍率的提高,激光输出能量有下降的趋势,谐振腔最佳放大倍率小于 2;在充电电压为 26 kV 时激光输出能量先提高后下

降,谐振腔最佳放大倍率为 2;在充电电压为 27 kV 情况下,随着谐振腔放大倍率的提高,激光输出能量也逐
渐提高,最佳放大倍率为 2.5 或者更高。谐振腔不同放大倍率对应着不同的输出耦合,在放大倍率较高情况
下,输出耦合也较大。不同的充电电压对应气体增益介质不同的激励程度,较高充电电压对应较高的激光增
益,因此,可以采用较高的输出耦合得到较大的激光脉冲能量。在充电电压提高到 27 kV 条件下,谐振腔的
最佳放大倍率可以提高到 2.5 或者更高。从激光输出能量角度看,谐振腔的最佳放大倍率与激光器的放电
激励有关,由此可知,为了得到较好的激光光束质量,谐振腔放大倍率需要提高到 2.5 以上,激光器充电电压
也需要提高到约 27 kV。

图 7 给出了充电电压为 27 kV 情况下,进一步提高谐振腔放大倍率对激光输出能量影响。谐振腔放大
倍率在 1.5~2.5 范围内,谐振腔放大率增加,有效输出耦合提高,更多的激光能量输出到谐振腔外,激光脉
冲能量增大。对应的激光衍射极限倍数由 2.66 降至 2.35,衍射极限倍数逐渐减小,激光光束质量也得到改
善。如果放大倍率增加至 3,模体积直径增加至 12 mm,虽然激光光束质量没有得到进一步提高,但仍然可
以提高激光输出能量。当 $M=3.6$ 时,激光输出能量下降,这是因为腔参数不匹配,使得激光模体积超过了
激光输出口径,激光输出损耗增大,激光脉冲输出能量降低。所以,为了得到较好的光束质量和较高的激光
输出能量,激光器的放大倍率应该取为 3 左右。

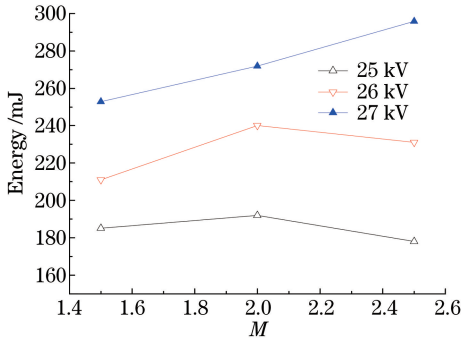


图 6 不同充电电压下放大倍率对激光输出能量的影响
Fig. 6 Laser output energy versus magnification under different charge voltages

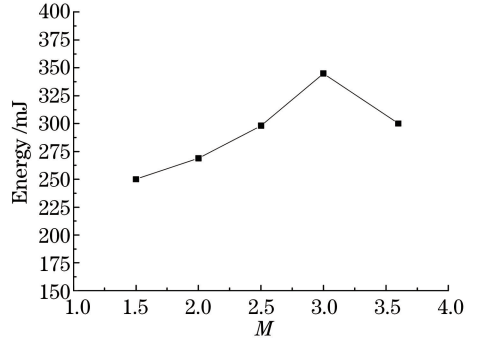


图 7 不同放大倍率下激光输出能量
Fig. 7 Laser output energy under different magnifications

以上研究仅针对激光器单次运行条件下的激光光束质量进行了优化,对于重复频率运行的脉冲激光器,
激光工作气体需要流动,气体的不同流动速率对应不同的放电增益区置换速率,会对重复频率条件下激光光
束质量产生一定影响,项目组将在后续工作中开展气体流速等因素对重复频率工作条件下激光光束质量的
影响研究。

4 结 论

利用非稳腔对实验室放电激励非链式 HF 激光器的激光光束质量进行了优化,光束质量由稳定腔的 x
轴 3.7 倍衍射极限、 y 轴 9.4 倍衍射极,提高到现在的 2.35 倍衍射极限,采用非稳腔可以明显地改善激光光
束质量。实验结果表明,对于实验室特定电极几何结构的脉冲 HF 激光器,为了得到较好的光束质量和较高
的输出能量,实验室脉冲 HF 激光器谐振腔的最佳放大倍率应该取为 3。谐振腔模体积需要和放电区截面
相匹配,在模体积不超过放电区增益体积的 80% 的情况下,激光光束质量较好。

参 考 文 献

- [1] Deutsch F T. Molecular laser action in hydrogen and deuterium halides[J]. Appl Phys Lett, 1967, 10(8): 234-236.
- [2] Appollov V V, Firsov K N, Kazantsev S Y, et al. High power non-chain HF (DF) lasers initiated by self-sustained volume discharge[C]. SPIE, 1998, 3574: 374-384.
- [3] Lacour B, Gagnol C, Prigent P, et al. High average power HF/DF laser[C]. SPIE, 1998, 3574: 334-340.
- [4] Appollov V V, Firsov K N, Kazantsev S Y, et al. Scaling up of non-chain HF (DF) laser initiated by self-sustained volume discharge[C]. SPIE, 2000, 3886: 370-381.

- [5] Tarasenko V F, Panchenko A N, Orlovskii V M. Efficient non-chain discharge HF and DF lasers[C]. SPIE, 2004, 5448: 359-365.
- [6] Baskht E H, Panchenko A N, Tarasenko V F. Discharge lasers pumped by generators with inductive energy storage [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(3): 261-266.
- [7] Alekseev S B, Wang L, Erofeev M V, *et al.* A periodically pulsed DF gas- discharge laser [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2003, 46(2): 222-224.
- [8] Appollov V V, Belevtsev A A, Firsov K N, *et al.* Advanced studies on powerful wide-aperture non-chain HF (DF) laser with a self-sustained volume discharge to initiate chemical reaction[C]. SPIE, 2003, 5120: 529-541.
- [9] Brunet H, Mabru M, Voignier F. High energy high average power pulsed HF/DF chemical laser[C]. SPIE, 1995, 2502: 388-392.
- [10] Ke Changjun, Tan Rongqing, Wu Jin, *et al.* A new discharge type for non-chain pulsed HF/DF laser [J]. Laser Technology, 2008, 32(2): 119-121.
柯常军, 谭容清, 吴 谨, 等. 非链式脉冲 HF/DF 激光的新型引发技术 [J]. 激光技术, 2008, 32(2): 119-121.
- [11] Ke Changjun, Wan Chongyi, Zhou Jinwen, *et al.* High peak power pulsed HF laser [J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 480-482.
柯常军, 万重怡, 周锦文. 高峰值功率脉冲氟化氢激光器 [J]. 激光技术, 2004, 28(5): 480-482.
- [12] Tan Gaijuan, Xie Jijiang, Pan Qikun, *et al.* Design and experimental investigation on unstable resonator for non-chain pulsed DF laser [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102004.
谭该娟, 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.
- [13] Guo Ruhai, Zhang Laiming, Yan Guilong. High power pulsed TEA CO₂ laser with unstable resonator [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s1): 82-85.
郭汝海, 张来明, 杨贵龙. 高功率脉冲非稳腔 TEA CO₂ 激光器 [J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 82-85.
- [14] Luo Shirong, Lü Baida, Huang Lu. The far-field intensity distribution and beam quality of unstable resonators [J]. Laser Technology, 1999, 23(5): 281-284.
罗时容, 吕百达, 黄 鹭. 非稳定腔的远场光强分布和光束质量 [J]. 激光技术, 1999, 23(5): 281-284.
- [15] Liu Zejin, Lu Qisheng, Zhao Yijun. Study of evaluating beam quality of high energy lasers with unstable resonators [J]. Chinese J Lasers, 1998, 25(3): 193-196.
刘泽金, 陆启生, 赵伊君. 高能非稳腔激光器光束质量评价的探讨 [J]. 中国激光, 1998, 25(3): 193-196.