

非链式脉冲 DF 激光器非稳腔设计与实验研究

谭改娟^{1,2} 谢冀江¹ 潘其坤^{1,2} 邵春雷¹ 张传胜¹ 阮鹏^{1,2} 郭劲¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 采用正支虚共焦腔型对非链式脉冲 DF 激光器进行非稳腔参数设计并开展实验研究, 通过与平凹型稳定腔的对比, 揭示了非稳腔在压缩激光远场发散角、提升光束质量方面的显著优势。选取能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衍射极限倍数 β 为光束质量评价参数, 实验中以 86.5% 环围能量定义光斑大小, 并利用 90-10 刀口法测量光斑尺寸。通过对不同放大率及模体积的 9 组非稳腔实验结果的对比, 得到了设计优化非稳腔结构参数的规律。综合输出能量、远场发散角、衍射极限倍数 β 三方面因素, 得到了最佳非稳腔参数为放大率 $M=1.89$, 后反射镜口径 $D=40$ mm, 此时激光远场发散角(全角)为 0.74 mrad, $\beta=1.35$, 输出能量为 1.86 J, 峰值功率为 16.4 MW。

关键词 激光器; DF 激光器; 正支虚共焦非稳腔; 衍射极限倍数; 刀口法

中图分类号 TN242; TN248.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0102004

Design and Experimental Investigation on Unstable Resonator for Non-Chain Pulsed DF Laser

Tan Gaijuan^{1,2} Xie Jijiang¹ Pan Qikun^{1,2} Shao Chunlei¹
Zhang Chuansheng¹ Ruan Peng^{1,2} Guo Jin¹

¹ State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract By employing positive branch confocal unstable resonator, design of cavity parameters and experimental research on non-chain pulsed DF laser are carried out. The advantages of suppressing divergence angle and improving beam quality are shown by comparing plano-concave stable resonator with unstable resonator. To estimate the beam quality, diffraction limit magnification β is chosen as evaluating criterion, which can incarnate both the energy focusing degree and divergence angle excursion. 86.5% enveloping energy is used to define spot size, and 90-10 knife edge method is adopted to measure it. Nine sets of mirrors with different magnifications and mode volumes are tested and compared, and optimization method of unstable cavity parameters is concluded. Taking energy, divergence and diffraction limit magnification into account, the optimal parameters are $M=1.89$, $D=40$ mm. Laser beam with divergence angle of 0.74 mrad, $\beta=1.35$, laser energy of 1.86 J, and peak power of 16.4 MW is obtained at these parameters.

Key words lasers; DF lasers; positive branch confocal resonator; diffraction limit magnification; knife edge method

OCIS codes 140.1550; 140.3410; 140.3295; 140.3538

收稿日期: 2013-06-24; 收到修改稿日期: 2013-08-27

基金项目: 科技部国际合作专项基金(2011DFR10320)

作者简介: 谭改娟(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光技术及其应用等方面的研究。

E-mail: tangaijuan_1030@163.com

导师简介: 谢冀江(1959—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事激光器及其应用技术等方面的研究。

E-mail: laserxjj@163.com(通信联系人)

1 引言

氟化氘(DF)激光器输出波长为 $3.5\sim 4.2\ \mu\text{m}$, 属中红外波段。该波段处于大气透射窗口且包含众多分子及原子的吸收峰,因而在光谱、遥感、军事、医疗等领域应用广泛^[1-2]。相比于其他中红外激光源,DF 激光器因更易获得高能量、高功率的输出而备受关注。目前非链式脉冲 DF 激光器多采用横向激励气体放电引发的工作方式^[3-5]。关于 DF 激光器的研究,如何获取高能量、高功率激光输出固然是研究重点,但如何提升激光光束质量亦是不可或缺的研究内容,而作为激光器重要组成部分的光学谐振腔在影响输出光束质量上起着举足轻重的作用。研究中通常选用的谐振腔腔型为平凹稳定腔,重点主要是放在获取高能量(或功率)的激光输出上,而对光束质量的考虑较少,但光束质量往往是制约该激光器实际应用的重要因素。为兼顾输出能量(或功率)和光束质量这两项重要的技术指标,非稳腔技术的应用逐渐成为该类型激光器的一项重要研究内容^[6-7]。非稳腔的结构决定了其同时具有较好的横模鉴别能力和大的模体积两大优点,从而对于脉冲 DF 激光器来讲,它是获得高能量和高光束质量的较好腔型选择。在非链式脉冲 HF/DF 激光器非稳腔研究中,法国的 Brunet 等^[8]选取放大率 $M=3.4$ 正支共焦腔进行实验,得出激光输出能量稍低于稳定腔的结论,俄罗斯的 Apollonov 等^[9]进行 $M=3$ 正支共焦腔实验,得到四倍衍射极限的发散角 $\theta_{0.5} = 0.29\ \text{mrad}$,而至今国内未见相关报道。

本文将重点介绍基于本实验室已有的非链式脉冲 DF 激光器实验样机进行的非稳定光学谐振腔的设计与实验研究情况。研究中设计加工了具有三种放大率、三种模体积的正支虚共焦非稳腔,通过 9 组非稳腔之间的对比,寻找优化非稳腔结构参数的规律,同时通过与平凹稳定腔输出光束参数的对比,展示了将非稳腔结构用于非链式脉冲 DF 激光器上的显著优势。

2 光束质量评价参数的选取及测试方法

长期以来,对于激光光束质量并没有明确的定义和统一的评价标准。在实际工作中,可依据具体的应用目的对评价参数进行选取。常用的评价参数包括聚焦光斑尺寸、远场发散角 θ 、衍射极限倍数 β 和 M^2 因子等^[10-11]。

通过测量聚焦光斑给出光束质量评价的方法简

便易行,却与聚焦系统有很大关系;远场发散角与可聚焦能量(功率)有关,在实际测量中,通常将聚焦系统的焦平面等效成远场,利用测量得到的焦斑直径和焦距之比即可得到远场发散角(全角);衍射极限倍数 $\beta = \theta_{\text{actual}}/\theta_{\text{ideal}}$,它给出的是实际光束相对于理想光束的偏移程度, β 越接近于 1,说明实际光束质量越好; M^2 因子是目前评价光束质量最常用的参数,它同时考虑了束宽和远场发散角两个因素,避免了只用聚焦光斑尺寸或远场发散角作为标准所带来的不确定性。

本文选取衍射极限倍数 β 作为激光光束质量评价参数,主要是基于两方面的考虑:一方面是对能量集中度的考虑,远场发散角能很好地反映能量的可集中程度;另一方面由 β 可得实际光束跟理想光束的偏移程度。在 $\beta = \theta_{\text{actual}}/\theta_{\text{ideal}}$ 定义中,理想发散角对应的是理想光束的远场发散角,而对于非稳腔选取被环形光阑截断的平面波作为理想光束^[12]。该参数的获得,归根结底是远场发散角的实验测量和理论近似计算。在远场发散角的测量与计算中,需对光斑大小进行定义,本文以 86.5% 环围能量定义光斑大小,即将包含了 86.5% 总能量的圆的半径定义为光斑半径。实验中采用聚焦法对远场光束发散角进行测量,利用焦距为 f 的凸透镜对输出光束进行聚焦,在焦平面上得到焦斑半径 d ,利用公式 $\theta = d/f$ 即可计算远场发散角 θ 。数据处理时,对于聚焦光斑的光强分布,做了高斯分布近似处理。光斑的测量方法有多种,包括可变光阑法、移动刀口法、移动狭缝法等。实验中选用操作简单、精度较高的 90-10 刀口法^[13]进行焦斑半径的测量,其基本原理如下:将刀口垂直光束放置,沿垂直光轴方向移动切割光束,记录能量透射率 90% 和 10% 的两个位置 x_1 、 x_2 ,由这两个位置确定它们与光斑中心的距离 $x = |x_2 - x_1|/2$,利用 x 与光斑半径的换算关系,便可得到高斯光束光斑半径。

3 设计与计算

3.1 非稳腔设计方法及参数

具有可得到近平行光输出优点的非稳腔有正支虚共焦和负支实共焦两种,负支实共焦腔因在腔内形成实焦点会导致工作介质的严重变化,进而造成激光输出性能变差,因而实验选取的是正支虚共焦非稳腔,其结构如图 1 所示。前后反射镜的曲率半径 R_1 、 R_2 ,腔长 L ,放大率 M 满足如下关系式:

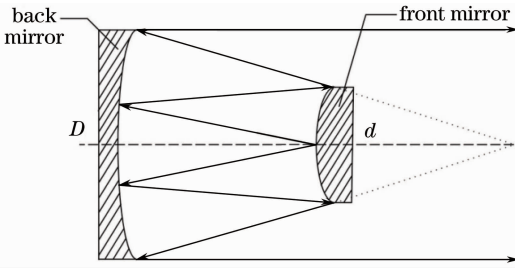


图 1 虚共焦非稳腔结构图

Fig. 1 Structure of the positive-branch confocal resonator

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

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

实验所用非链式脉冲 DF 激光器平凹腔腔长为 2.2 m，为方便非稳腔的装调，采用布氏窗密封的全外腔设计。实验选取的非稳腔腔长范围为 2.6~2.9 m，选取大小为 1.5~2.5 范围内的三组放大率，进行反复计算最终设计确定了具有三种放大率、三种模体积的 9 组非稳腔组合。具体结构参数如表 1 所示。

表 1 非稳腔设计参数

Table 1 Parameters of unstable resonators

R_2/mm	R_1/mm	M	L/mm	d/mm		
				$D=36\text{ mm}$	$D=38\text{ mm}$	$D=40\text{ mm}$
15760	-10000	1.576	2880	22.84	24.11	25.38
11343.4	-6000	1.89	2671.7	19.04	20.10	21.16
10000	-4500	2.22	2750	16.20	17.10	18.00

3.2 远场发散角理论计算

该部分将第 2 节中提到的被环形光阑截断的平面波作为理想光束，由此通过该平面波远场分布近似来计算 θ_{ideal} ，计算结果称为远场发散角的理论计算值。

非稳腔输出激光的远场分布可按平面波经环形光阑形成的夫琅禾费衍射场分布给出，即

$$I(\phi) = \left\{ \frac{M^2}{M^2-1} \left[\frac{2J_1(\phi)}{\phi} - \frac{2J_1(\phi/M)}{M\phi} \right] \right\}^2 I(0), \quad (3)$$

式中 $\phi = k\theta a_2$ ， a_2 是环形光阑外半径 ($a_2 = D/2$)， $k = 2\pi/\lambda$ ， λ 取 $3.8\ \mu\text{m}$ 。

利用 86.5% 环围能量定义光斑大小，从而根据

$$\frac{\int_0^{\phi_0} \phi I(\phi) d\phi}{\int_0^{\infty} \phi I(\phi) d\phi} = 0.865 \quad (4)$$

求得环围能量为 86.5% 所对应的 ϕ_0 ，进而得到远场发散角 θ 理论计算值，具体计算结果如表 2 所示。

表 2 非稳腔远场发散角理论计算结果

Table 2 Theoretical results of unstable resonators

M	ϕ_0/rad	$2\theta/\text{mrad}$		
		$D=36\text{ mm}$	$D=38\text{ mm}$	$D=40\text{ mm}$
1.576	11.864	0.7972	0.7553	0.7175
1.89	9.062	0.6090	0.5769	0.5481
2.22	7.87	0.5289	0.5010	0.4760

4 实验装置、结果及分析

4.1 实验装置

非链式脉冲 DF 激光器非稳腔实验装置如图 2 所示，激光器实物图如图 3 所示。激光器采取放电引发方式，电极尺寸为 $1200\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ，电极间距 40 mm。激光器放电区两端由两块 CaF_2 材料的布儒斯特窗进行密封，光学谐振腔由一对反射率均为 99% 的凸、凹面镀金铜镜构成，激光由凸面反射镜一端形成环形光斑输出，光束输出后经一块分光镜分成两路，第 1 路用于能量监测，第 2 路用于聚焦光斑的测量。起密封作用的两块布儒斯特窗成镜像放置，这样可抵消激光光线垂直于光轴方向的位移^[14]。第 2 路光路中，插入焦距 $f=1000\text{ mm}$ 的聚焦镜，并在其焦平面处放置刀口，焦点后放置能量计用于能量接收。实验时激光器工作条件如下：总气压 10 kPa，气

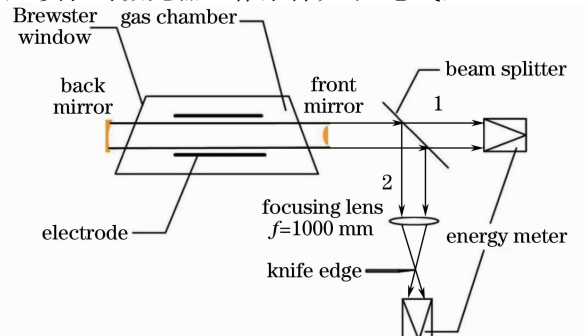


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup

体 SF₆ 与 D₂ 体积比 10:1, 工作电压 34 kV。

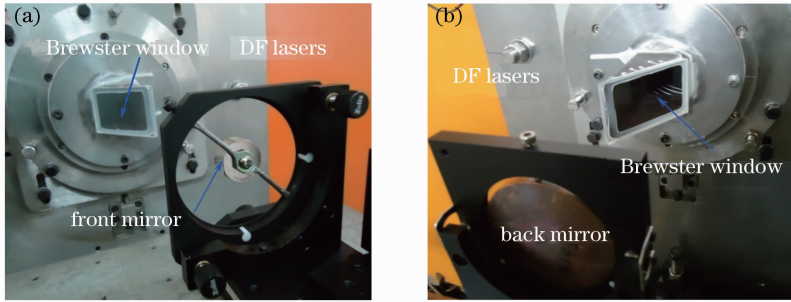


图 3 DF 激光器实物图。(a) 前视图; (b) 后视图

Fig. 3 DF lasers. (a) Front view; (b) rear view

4.2 实验结果及分析

图 4 给出了不同放大率条件下激光输出能量随反镜口径变化的实验结果。可以看出, 在同一放大率下, 后反镜 $D=38$ mm 较 36、40 mm 输出能量偏大。根据激光光学理论, 后反镜口径越大, 模体积越大, 得到的输出激光能量越大, 而实验中激光脉冲能量在 $D=38$ mm 时达到最大值, 这可能是由于电极间工作气体放电不均匀以及电极边缘未完全放电等离子体对激光的屏蔽造成的^[15-17]。实验中采用的电极间距为 40 mm, 当后反镜口径 $D=40$ mm 时, 在同一放大率条件下, 前反镜口径也偏大, 此时激光靠近电极边缘输出, 而电极边缘未完全放电等离子体对激光屏蔽作用严重, 另外放电区边缘的增益系数也较低, 而后反镜口径 $D=38$ mm 所对应的腔镜组合正好限制了电极边缘的激光振荡, 消除了电极边缘未完全放电等离子体对激光的屏蔽作用, 因此 $D=40$ mm 整体输出能量低于 $D=38$ mm 整体输出能量。在同一后反镜口径下, 放大率 $M=1.89$ 时能量最高, 而 $M=1.576$ 时相对其他两组能量下降很多, 该现象的出现主要是受腔长和可获取总增益的影响。腔长越短, 损耗越小, 输出能量越高; 放大率越大, 输出耦合率 $1-1/M^2$ 越大, 偏折损耗越大, 可获取总增益越小, 输出能量越小。腔长和可获取总增益二者的影响情况无法量化, 而从实验结果看, 腔长对于能量的影响作用较大。放大率 $M=1.89$ 时腔长最短, 放大率居中, 相对其他两组能量最高; 放大率 $M=1.576$ 时腔长最长, 虽然放大率较小, 腔长带来的损耗大于可获取的总增益, 从而输出能量最小。放大率 $M=1.89$ 时电极间距限制造成的反射镜片尺寸限制不如其他两组明显, 这主要是由放电电极间等离子体的吸收饱和所引起的, 该组激光输出能量高, 等离子体对激光的吸收易达到饱和, 那么电极边缘未完全放电等离子体对激光

的屏蔽作用将减弱, 从而该放大率下 $D=40$ mm 时能量下降不如其他两组明显。

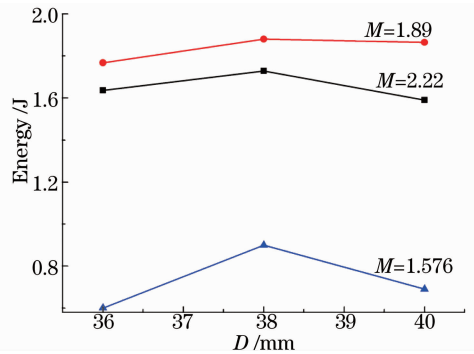


图 4 能量对比图

Fig. 4 Comparison of laser energy

图 5 为 $M=1.89, D=36$ mm 腔镜组合近场光斑, 其中环状光斑上的缺口是由于前反镜支架对输出光束的遮挡造成的。

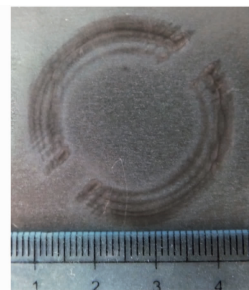


图 5 热敏纸上近场光斑图

Fig. 5 Near-field spot on thermo-sensitive paper

获得如图 5 所示光斑后利用焦距为 1000 mm 的聚焦透镜将输出光束聚焦, 于焦点处放置刀口, QE50LP-H-MB 型 Gentec 能量计置于焦点后进行能量监测, 移动刀口可得到能量随刀口位置变化的数据, 对实验获得的数据进行三次样条函数插值, 并将插值后的数据进行光滑归一化处理, 进而得到归一化能量随刀口位置的变化曲线, 如图 6 所示。由图 6 得到归一化能量 0.9 和 0.1 间的位置差, 乘以

换算系数 1.56 后即得到聚焦光斑直径,由聚焦光斑直径与焦距之比即得到实际的远场发散角(全角)。图 6(a)、(b)分别给出了 $M=1.89, D=40\text{ mm}$ 组非

稳腔与稳定腔(由曲率半径 11343 mm 的凹面镀金铜镜和反射率为 20% 的 CaF_2 平面输出镜腔镜组成)各自对应的能量与刀口位置的变化曲线。

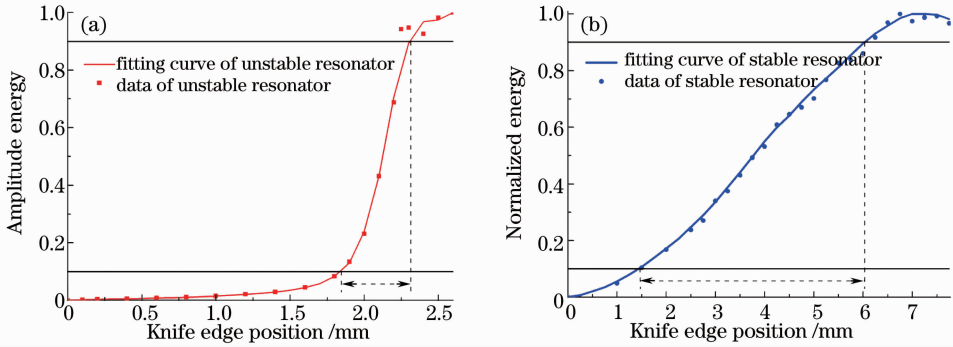


图 6 归一化能量相对刀口位置的变化曲线。(a) 非稳腔;(b) 稳定腔

Fig. 6 Normalized energy versus knife edge position. (a) Unstable resonator; (b) stable resonator

图 7 给出理论计算与实验发散角的对比。可以看出,实验得到的远场发散角随放大率的增大而减小,这与理论计算结果相符;在同一放大率下,理论计算结果显示远场发散角随后反镜口径的增大而减小,且具有线性下降趋势,实验得到的远场发散角与理论远场发散角有相同的下降趋势,但并不与后反镜口径成反比,二者的偏差应考虑到理论计算同实际情况之间的差距。理论计算过程中,假定的是远场光强分布在同一放大率下完全相同;而在实际情况中,从实验结果可以很明显地看到,不同后反镜口径时的输出能量不一,如 $D=40\text{ mm}$ 时有能量下降

趋势,这将使得最终获得的远场光强分布不可能完全相同,从而远场发散角不再与理论计算规律一致,不是仅跟后反镜口径成反比关系,进而远场发散角变化趋势将偏离线性下降走势。理论上讲非稳腔可得到平行光输出,远场发散角的理论计算也是基于平面波经环形光阑后的夫琅禾费衍射得到的,而实际激光在腔内经多次往返振荡输出的并非平行光,这是除实验过程中非稳腔腔镜失调外实验值较理论值高的另一主要原因。总之,实际测量的远场发散角与理论计算的远场发散角变化规律基本一致。

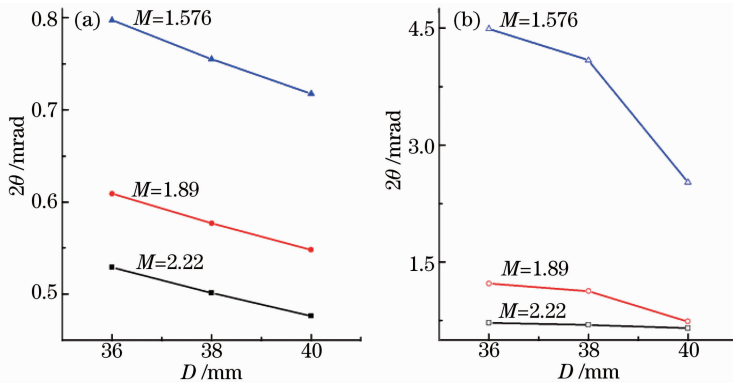


图 7 理论、实验发散角对比图。(a) 理论计算值;(b) 实验值

Fig. 7 Comparison between theoretical and experimental divergence angle. (a) Theoretic values; (b) experimental values

用于对比的平凹腔,其实验得到的远场发散角为 7.15 mrad,约为 $M=1.89, D=40\text{ mm}$ 组非稳腔激光远场发散角的 10 倍,这充分证明了将非稳腔用于非链式脉冲 DF 激光器能有效减小发散角、改善光束质量这一事实。

角 θ 计算得出的衍射极限倍数 β 。由表 3 可知,随着放大率的增大,衍射极限倍数大体呈下降趋势,因而在非稳腔研究中应尽可能选取放大率较大的腔镜组合。综合考虑上述能量、远场发散角、 β 值等激光输出参数, $M=1.89, D=40\text{ mm}$ 组腔镜为 9 组中输出性能最佳的非稳腔腔镜组合。

表 3 给出了根据实验测得的激光输出光束发散

表 3 衍射极限倍数 β 值
Table 3 Experimental β values

M	β		
	$D=36$ mm	$D=38$ mm	$D=40$ mm
1.576	5.63	5.41	3.51
1.89	2.01	1.96	1.35
2.22	1.36	1.39	1.37

5 结 论

重点阐述了在非链式脉冲 DF 激光器实验样机上展开的非稳腔设计和实验研究情况,通过与平凹稳定腔的对比,展示了非稳腔在压缩发散角、提高光束质量方面的显著优势。实验结果表明,全外腔实验宜选用短腔长,避免因损耗增加造成的输出能量下降,后反射镜口径宜小于电极间距,尽量避免电极边缘未完全放电等离子体对激光的屏蔽作用,从而获得较高的输出能量。实际测量的远场发散角与理论计算的远场发散角变化规律基本一致,即增大放大率 M 将减小远场发散角,因而进行非稳腔实验宜选用大放大率的腔镜组合。综合考虑能量、发散角和衍射极限倍数 β 三方面因素,9 组非稳腔腔镜组合中的最优参数为放大率 $M=1.89$ 、后反射镜口径 $D=40$ mm,在该腔镜组合下得到的激光远场发散角(全角)为 0.74 mrad, $\beta=1.35$,激光输出能量为 1.86 J,脉宽为 113.4 ns,计算得到的峰值功率为 16.4 MW。

参 考 文 献

- 1 Ke Changjun. Electric-Discharge Non-Chain Pulsed HF Laser [D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2002. 8-10.
柯常军. 放电引发的非链式脉冲 HF 激光器[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2002. 8-10.
- 2 Ruan Peng, Xie Jijiang, Zhang Laiming, *et al.*. Computer modeling and experimental study of non-chain pulsed electric-discharge DF laser [J]. Opt Express, 2012, 20(27): 28912-28922.
- 3 V V Apollonov, K N Firsov, S Y Kazantsev, *et al.*. Scaling up of non-chain HF (DF) laser initiated by self-sustained volume discharge[C]. SPIE, 2000, 3886: 370-381.
- 4 Pan Qikun, Xie Jijiang, Ruan Peng, *et al.*. Discharge parameters of non-chain pulsed DF laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502009.
潘其坤, 谢冀江, 阮 鹏, 等. 非链式脉冲 DF 激光器放电特性[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502009.
- 5 Tang Ying, Huang Ke, Yi Aiping, *et al.*. Experimental study on stable output of discharge-pumped repetition rate HF laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202004.

- 唐 影, 黄 珂, 易爱平, 等. 放电激励重复频率 HF 激光器稳定输出实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202004.
- 6 Jin Yuqi, Sun Yizhu, Sang Fengting, *et al.*. Experimental investigation of unstable resonator for a CW supersonic COIL[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1997, 9(2): 227-232.
金玉奇, 孙以珠, 桑凤亭, 等. 化学氧碘激光器非稳腔的研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(2): 227-232.
- 7 Guo Ruhai, Zhang Laiming, Yang Guilong, *et al.*. 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, 等. 高功率脉冲非稳腔 TEA CO₂ 激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 82-85.
- 8 H Brunet, M Mabru, F Voignier. High energy-high average power pulsed HF/DF chemical laser[C]. SPIE, 1995, 2502: 388-392.
- 9 V V Apollonov, A A Belevtsev, K N Firsov, *et al.*. Advanced studies on powerful wide-aperture non-chain HF (DF) lasers with a self-sustained volume discharge to initiate chemical reaction[C]. SPIE, 2003, 5120: 529-541.
- 10 Lü Baida. Laser Optics: Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics (Third Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 75-95.
吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理(第 3 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 75-95.
- 11 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.
罗时荣, 吕百达, 黄 鹭. 非稳腔的远场光强分布和光束质量[J]. 激光技术, 1999, 23(5): 281-284.
- 12 Liu Zejin, Lu Qisheng, Zhao Yijun. Study of evaluating beam quality of high energy lasers with unstable resonators[J]. Chinese J Lasers, 1998, A25(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, A25(3): 193-196.
- 13 Yang Xiaodong, Shao Jianxin, Liao Shenghong, *et al.*. Investigation on measuring beam width of the Gaussian beam by knife-edge method[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(8): 829-832.
杨晓冬, 邵建新, 廖生鸿, 等. 刀口法测量高斯光束光斑半径研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 829-832.
- 14 Shi Shunxiang, Wang Xue'en, Liu Jinsong. Physical Optics and Applied Optics (Second Edition)[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008. 33-36.
石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学(第二版)[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008. 33-36.
- 15 Y N Aksenov, V P Borisov, V V Burtsev, *et al.*. A 400 W repetitively pulsed DF laser[J]. Quantum Electron, 2001, 31(4): 290-292.
- 16 Ruan Peng, Xie Jijiang, Zhang Laiming, *et al.*. UV-preionized electric-discharge non-chain pulsed DF laser [J]. Chinese J Luminescence, 2013, 34(4): 450-455.
阮 鹏, 谢冀江, 张来明, 等. 紫外预电离放电引发的非链式脉冲 DF 激光器[J]. 发光学报, 2013, 34(4): 450-455.
- 17 Yi Aiping, Liu Jingru, Tang Ying, *et al.*. Electrically initiated repetitive-pulsed non-chain HF lasers[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 360-366.
易爱平, 刘晶儒, 唐 影, 等. 电激励重复频率非链式 HF 激光器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 360-366.

栏目编辑: 张 腾