

非链式脉冲 DF 激光器增益分布特性

潘其坤^{1,2}, 谢京江¹, 谢冀江¹, 张来明¹, 阮鹏^{1,2}, 杨贵龙¹, 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: 为了研究非链式脉冲 DF 激光器的增益分布特性, 在考虑谱线碰撞加宽和多普勒加宽对增益系数影响的基础上, 运用变耦合率法给出了计算增益系数的简便公式。利用光阑移动扫描采样法, 实验测量了不同输出镜透过率条件下 DF 激光器增益区横截面上各采样点的激光输出功率。对于每个采样点, 计算得到两个独立的增益系数, 其标准差小于 3%。激光平均增益系数为 2.5943 m^{-1} , 非输出损耗系数为 1.2435 m^{-1} 。对各采样点的增益系数进行二维插值, 结果显示在激光增益区横截面上增益系数呈现中央高、边缘低的超高斯分布。研究成果可为非链式脉冲 DF 激光器谐振腔和电极结构设计提供依据, 并可为该激光器的气体放电均匀性分析提供参考。

关键词: DF 激光器; 增益分布; 变耦合率法; 二维插值

中图分类号: TN248.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0360-05

Investigation on gain distribution characteristic of non-chain pulsed DF laser

Pan Qikun^{1,2}, Xie Jingjiang¹, Xie Jijiang¹, Zhang Laiming¹, Ruan Peng^{1,2}, Yang Guilong¹, Guo Jin¹

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

Abstract: In order to investigate the gain distribution characteristic of non-chain pulsed DF laser, based on the influence of collision widen and Doppler widen of spectrum on gain coefficient, the simple equations were given to calculate the gain coefficient using the variable output coupling method. Under the conditions of different output mirror transmission, utilizing the method of moving iris to scan sample, the DF laser output power of every sampling position had been measured on the cross-section of gain medium. For arbitrary sampling position, two independent gain coefficients were calculated which standard deviation was less than 3%. Average gain coefficient of DF laser was 2.5943 m^{-1} and the non-output loss coefficient was 1.2435 m^{-1} . For gain coefficients of each sampling position, two-dimensional interpolation algorithm had been used to obtain gain distribution on the cross-section of gain medium. The calculation showed that the gain coefficients submitted to super-Gauss-Poisson distribution which was high in the central and low in the margin. The investigation could provide a guide to design resonator and electrode

收稿日期: 2013-06-05; 修订日期: 2013-07-10

基金项目: 科技部国际合作专项基金(2011DFR10320); 中国科学院创新基金(CXJJ-11-Q80)

作者简介: 潘其坤(1985-), 男, 博士生, 主要从事脉冲激光器及其应用技术方面的研究。Email: panqikun2005@163.com

导师简介: 谢冀江(1959-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光器及其应用技术方面的研究。Email: Laserxjj@163.com

structure of non-chain pulse DF laser, and provide a reference to analyze the uniformity of gas discharge of this laser.

Key words: DF laser; gain distribution; variable output coupling method; two-dimensional interpolation algorithm

0 引言

非链式脉冲氟化氙(DF)化学激光器(3.5~4.2 μm)是目前中红外波段输出功率最大的激光器件之一,在激光光谱学、大气质量监测、激光与物质相互作用等诸多应用领域拥有广阔的应用前景^[1-4]。激光增益二维空间分布作为评价激光器激活介质均匀性的重要参数,直接影响激光器的输出性能,因而研究和改善激光增益的二维空间分布特性具有重要的实际意义。

激光器增益分布主要是通过激光增益系数的测试确定,其中较为准确的测试方法为直接放大测试法,该方法需要一台与待测激光器波长相匹配的种子光源经过待测激光器的激活介质,从而得到种子光增大的程度;然而由于非链式脉冲DF化学激光器结构复杂、体积庞大、造价昂贵,获得该激光器种子光源十分不便,因此一般不采用该方法测量DF激光器增益系数。极大损耗法或变耦合率法均无需种子光源即可间接测试激光器增益系数,但极大损耗法在腔内非输出损耗未知的情况下无法精确测试激光增益系数。变耦合率法通过改变输出镜透过率,在保持其他条件不变的情况下,分别测试激光输出功率,进而经过计算即可获得激光增益系数、总的非输出损耗系数及饱和光强^[5]。增益系数测量方法确定以后,增益分布测量的关键技术转化为二维空间扫描问题,这要求以某种方式使光束均匀扫描增益截面。通常的二维扫描系统主要由旋转柱面镜或垂直放置的一对扫描平面镜组成^[6-7],通过合理设定扫描镜的步长即可获得较精确的增益系数分布,然而二维扫描系统设计、装调均较为复杂且造价高。

针对非链式脉冲DF激光激活介质横截面积较大的特点,文中采用了光阑移动扫描采样法^[8]在整个激光增益区的横截面内选取若干个采样点进行激光输出功率的测量。运用变耦合率法计算得到各采样点的增益系数,进而利用二维插值算法获得激光增益二维空间分布。文中的研究意义在于获得激光

增益分布与放电均匀性间的对应关系,激光增益大小及分布的测量结果可为激光器谐振腔和电极结构的设计提供重要的依据。

1 理论分析

以气体为工作介质的非链式脉冲DF激光器,其辐射谱线来源于多个能级间的振转跃迁,谱线线型函数具有以碰撞加宽为主的均匀加宽和以多普勒加宽为主的非均匀加宽的特征,属于典型的综合加宽线型。运用变耦合率法测量激光增益系数已经得到了广泛的研究^[8-9],在此基础上,进一步考虑了谱线加宽对增益系数的影响,综合加宽激活介质增益系数可表示为^[10]:

$$g_v = g_0 W_r / \sqrt{1 + I_v / I_s} \quad (1)$$

式中: g_0 为中心频率处增益系数; I_s 为饱和光强; W_r 可用误差函数,即

$$W_r = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\mu e^{-t^2}}{t^2 + \mu^2} dt \quad (2)$$

公式(2)中 μ 的表达式为:

$$\mu = \frac{\Delta v_H}{\Delta v_D} \sqrt{1 + I_v / I_s} \times \sqrt{\ln 2} \quad (3)$$

式中: Δv_D 为多普勒线宽; Δv_H 为碰撞线宽。放电引发非链式脉冲DF激光器的工作原理为:在高压脉冲放电条件下,工作物质发生一系列复杂的化学反应生成激发态的DF分子,从而形成粒子数反转,此时腔内增益大于损耗,受激辐射激光逐步加强。随后由于放电的停止、腔内激光振荡及消激发作用的加强,DF反转粒子数密度不断降低,从而增益系数也随之降低。当增益等于损耗时,激光辐射输出最强,此后激发态DF分子继续被消耗,谐振光强减弱直至消失。文中研究增益与损耗相等时的DF激光增益系数,此时激光输出功率对应脉冲峰值功率。将公式(2)运用高斯-埃尔米特求积公式展开,得到综合加宽激光输出功率表达式:

$$P = \frac{1}{2} AT I_s \left(\frac{3.54 I g_0}{\pi \sqrt{\ln 2} (\alpha + T)} \cdot \frac{\Delta v_D}{\Delta v_H} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: A 为增益介质横截面积; l 为增益介质长度; α 为非输出损耗系数; T 为输出镜透过率。采用更换输出镜透过率的方法, 保持其它条件不变, 测量 3 组不同输出镜透过率时激光输出功率参数, 分别代入公式(4)可得:

$$I_s = \frac{2}{A} \frac{T_1 T_2 P_3 (P_1 - P_2) + T_2 T_3 P_1 (P_2 - P_3) + T_3 T_1 P_2 (P_3 - P_1)}{T_1 T_2 P_3 (T_2 - T_1) + T_2 T_3 P_1 (T_3 - T_2) + T_3 T_1 P_2 (T_1 - T_3)} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{T_1 T_2 T_3 (p_1 (T_2 - T_3) + p_2 (T_3 - T_1) + p_3 (T_1 - T_2))}{T_1 T_2 P_3 (T_2 - T_1) + T_2 T_3 P_1 (T_3 - T_2) + T_3 T_1 P_2 (T_1 - T_3)} \quad (6)$$

$$g_0 = \frac{(p + I_s T)(\alpha + T)}{I_s T} \cdot \frac{\pi \sqrt{\ln 2}}{3.54 l} \cdot \frac{\Delta v_H}{\Delta v_D} \quad (7)$$

将实验测得的输出功率及透过率等参数代入公式(5)~(7)可求得饱和光强、非输出损耗系数和激光增益系数。

2 实验装置及测试结果

实验装置如图 1 所示, 非链式脉冲 DF 激光器采用紫外预电离横向放电激励方式, 主放电电极长为 1.2 m、宽 4 cm 对称放置的不锈钢 Chang 氏电极, 电极间距为 4 cm, 预电离电极由均匀分布在主电极两侧的火花针阵列组成。工作气体 SF₆ 与 D₂ 的分压

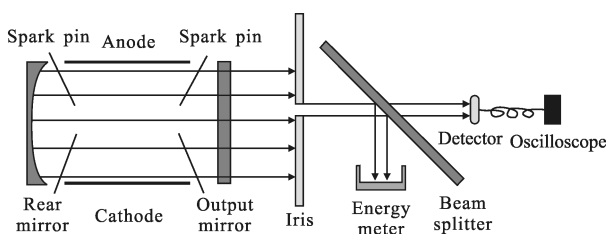


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Diagram of experimental device

比为 10:1, 总气压为 10 kPa, 放电电压为 38 kV。光学谐振腔采用平凹腔结构, 输出镜为镀膜 CaF₂ 平面镜。输出激光被口径为 5 mm 的腔外光阑遮挡后变为直径为 5 mm 的光束, 该光束经分光镜分为两路, 一路由能量计监测能量, 另一路经碲镉汞探测器接受后由示波器显示激光脉冲宽度, 由二者可计算得到通过光阑的激光功率。实验中, 光阑、能量计、分光镜、探测器放置在二维平移台上, 通过移动平台实现对激光功率的采样测试。激光功率测试采样点分布如图 2 所示, 选定的 25 个采样点(5×5 阵列)基本覆盖了整个激光束的横截面, 标号 1~25 表示测试点位置。保持其他条件不变, 选择输出镜透过率分别为

$T_1=90\%$ 、 $T_2=80\%$ 、 $T_3=70\%$ 、 $T_4=60\%$, 各采样点的激光功率测试结果如表 1 所示。

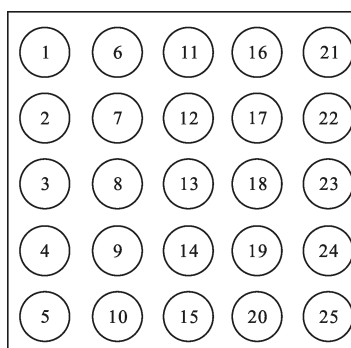


图 2 激光功率测试采样点分布图

Fig.2 Distribution map of sample point for laser power measurement

表 1 采样点的激光功率测量值

Tab.1 Measured values of laser power for

Sample point	Power/MW			
	T_1	T_2	T_3	T_4
1	0.473 5	0.558 3	0.575 2	0.524 2
2	0.485 8	0.568 7	0.586 3	0.531 5
3	0.492 7	0.574 8	0.590 6	0.535 3
4	0.485 4	0.572 2	0.594	0.534 2
5	0.476 7	0.562 6	0.582 1	0.530 0
6	0.489 8	0.578 5	0.590 6	0.538 1
7	0.508 5	0.59 3	0.601 7	0.548 9
8	0.518 2	0.603 5	0.622 2	0.561 7
9	0.512 3	0.597 4	0.616 2	0.558 3
10	0.496 1	0.579 1	0.591 5	0.543 3
11	0.498 5	0.585 4	0.599 1	0.544 1
12	0.515 7	0.598 4	0.612 7	0.556 1
13	0.518 5	0.607 5	0.631 2	0.564 7
14	0.516 1	0.603 4	0.625 2	0.562 3
15	0.501 8	0.586 1	0.602 5	0.551 3
16	0.492 6	0.579 5	0.592 4	0.540 1
17	0.510 3	0.596 2	0.603 7	0.549 2
18	0.518 5	0.604 5	0.624 5	0.562 1
19	0.514 1	0.599 4	0.618 3	0.558 2
20	0.498 3	0.581 1	0.593 4	0.541 8
21	0.479 4	0.563 5	0.578 1	0.527 8
22	0.486 5	0.570 4	0.588	0.531 2
23	0.492 3	0.575 7	0.593 2	0.535 7
24	0.488 3	0.571 3	0.585 5	0.532 1
25	0.478 2	0.563 5	0.581 2	0.527 8

3 实验结果处理与分析

由理论分析可知,任意取三组透过率及对应的激光输出功率数据,带入公式(5)~(7)即可得到一组增益及损耗系数。计算过程中,根据激光器充气参数,取多普勒线宽 $\Delta\nu_D=2.1819 \times 10^8$ Hz,碰撞线宽 $\Delta\nu_H=2.46 \times 10^8$ Hz,中心频率 ν 取为 7.895×10^{13} Hz。对于上述的四组实验数据,理论上共可求得四组增益参数,为了简化后续数据处理,同时保证四组数据在计算结果中均有体现,选取 $T_1、T_2、T_3$ 和 $T_1、T_3、T_4$ 两组数据进行处理,结果如表 2 所示。 $g_1、g_2$ 分别为第一、二组数据计算得到的增益系数, $\bar{g}_0、\sigma$ 分别为同一采样点 $g_1、g_2$ 增益系数的平均值和标准差,为同一采样点非输出损耗系数的平均值,统计量为各列相关结果的平均值。

表 2 采样点数据处理结果

Tab.2 Data processing results of sample point

Sample point	g_1/m^{-1}	g_2/m^{-1}	\bar{g}_0/m^{-1}	$\sigma/\%$	$\bar{\alpha}/m^{-1}$
1	2.567 9	2.588 9	2.578 4	1.492	1.239 7
2	2.587 5	2.600 3	2.593 9	0.909	1.257 3
3	2.591 0	2.605 3	2.598 2	1.009	1.246 0
4	2.583 5	2.602 4	2.593 0	1.336	1.268 5
5	2.571 5	2.586 5	2.579 0	1.063	1.261 8
6	2.564 4	2.594 6	2.579 5	2.132	1.189 2
7	2.588 4	2.607 5	2.597 9	1.349	1.194 3
8	2.603 9	2.609 3	2.606 6	0.378	1.269 8
9	2.600 9	2.603 4	2.602 1	0.173	1.275 1
10	2.584 7	2.594 6	2.589 7	0.704	1.240 1
11	2.573 2	2.601 0	2.587 1	1.959	1.207 3
12	2.600 3	2.610 0	2.605 2	0.685	1.244 0
13	2.611 0	2.613 2	2.612 1	0.158	1.295 8
14	2.607 2	2.608 6	2.607 9	0.102	1.288 4
15	2.588 6	2.592 8	2.590 7	0.298	1.265 9
16	2.570 2	2.595 7	2.582 9	1.808	1.205 7
17	2.587 5	2.610 6	2.599 0	1.634	1.175 6
18	2.606 7	2.611 3	2.608 9	0.321	1.276 7
19	2.601 6	2.608 1	2.604 9	0.458	1.269 4
20	2.586 6	2.601 5	2.594 1	1.054	1.226 6
21	2.571 8	2.592 1	2.581 9	1.429	1.228 9
22	2.582 9	2.603 9	2.593 4	1.489	1.244 6
23	2.589 4	2.606 5	2.598 0	1.203	1.250 1
24	2.581 2	2.601 7	2.591 5	1.451	1.226 6
25	2.570 5	2.593 2	2.581 9	1.603	1.241 2
Statistic	2.586 9	2.601 7	2.594 3	1.042	1.243 5

对比表 2 中同一采样点 $g_1、g_2$ 计算结果可知,运用变耦合率法测试得到的增益系数存在不一致,且 g_2 整体大于 g_1 。引起这种偏差的主要因素为:(1) 实验中采用的不同透过率输出镜由同一规格的 CaF_2 平面镜镀不同膜层所得,不同膜层引入的输出镜吸收、散射损耗必然不同,然而在计算过程中却忽略了这种差异,这将导致选择不同输出镜透过率及对应的输出功率数据组合时计算得到的增益系数存在整体偏差;(2) 谐振腔的微弱失调总是普遍存在的,每次更换输出镜引起的腔镜失调量具有不确定性,这将导致该透过率条件下整组的输出功率值具有一致性偏差,即该组非输出损耗系数将具有一致性偏差,这将引起增益系数的整体波动。另外导致该偏差的随机因素包括:(1) 高压放电引起的工作气体流动速率及方向均具有一定的不确定性,这种增益介质的变化将导致激光器增益系数及非输出损耗系数的波动;(2) 人为因素及测试设备引起误差不可避免,探测器、能量计、示波器等设备存在系统误差,手动调节移动平台存在随机误差,各种误差的存在是导致增益系数随机偏差的主要原因。但整体比较两组数据,同一采样点 $g_1、g_2$ 的标准差 $\sigma < 3\%$,证明计算结果的可信度较高,满足应用需求,该增益系数可为非链式脉冲 DF 激光器谐振腔设计提供支持。采用三次样条插值算法,对上述 25 个采样点的增益系数平均值按照采样位置在增益横截面上做二维插值,插值结果如图 3 所示,曲面上的点为采样点增益系数。

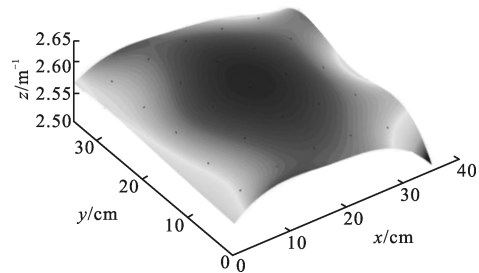


图 3 增益介质横截面上增益分布

Fig.3 Gain distribution of gain medium on cross-section

x 方向为横流激光器的气体流动方向, y 方向为由阴极指向阳极方向, z 为增益系数。由图 3 可知: x 方向增益分布的非均匀性最为明显,这主要由改进型 Chang 氏电极面型决定,Chang 氏电极的剖面中间大部分呈现为平顶,边缘部分为具有一定曲率的曲面。相比于电极边缘部分,电极中间平顶部分放电均匀

性好,注入能量大且较为均匀,因而 x 方向增益分布呈现出中央大边缘小的变化趋势, 这为激光电极剖面面型的设计提供了参考。 y 方向增益分布相对较均匀,但边缘增益也有降低的趋势,这主要由电极表面未完全放电等离子体对电极边缘激光的屏蔽造成,电极边缘激光输出功率下降反映为增益系数的降低。综合整个增益曲面,激光增益呈现中央高、边缘低的超高斯分布,这与辐射激光束呈高斯分布相吻合。图 4 给出了非链式脉冲 DF 激光器电极间放电照片,电极间的放电强度呈现出 x 方向边缘较弱、 y 方向相对均匀的分布状态,这与激光增益系数的二维插值结果相一致。由此可知,激光器的增益分布状态是反映电极间放电均匀性的一个重要参数。

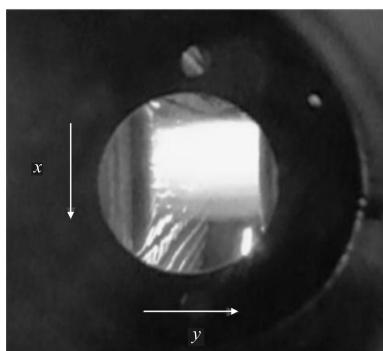


图 4 非链式脉冲 DF 激光器放电照片

Fig.4 Discharge photo of Non-chain pulse DF laser

4 结论

采用光阑移动扫描采样法便捷的实现了非链式脉冲 DF 激光器在光束横截面上的输出功率的测量,运用变耦合率法计算得到了个采样点的增益系数,并采用三次样条插值方法对增益系数进行了二维插值,得到了激光介质横截面上增益的二维分布。实验表明,在气体流动方向上,激光增益系数呈明显的非均匀分布:电极中间平顶部分增益较高,边缘增益下降明显;在垂直气体流动方向上,激光增益系数近似相等。DF 激光器增益分布状态可以准确反映电极间放电的均匀性,并可为非链式脉冲 DF 激光器谐振腔和电极结构的设计提供参考依据。

参考文献:

- [1] Tang Litie, Yu Zhichuang, Zhao Lezhi, et al. Total pressure losing of nozzles flow in DF/HF chemical laser by numerical simulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1194–1197. (in Chinese)
- [2] Zheng Shouguo, Li Miao, Zhang Jian, et al. Design and implementation of trace N_2O detection system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2154–2160. (in Chinese)
- [3] Huang Ke, Tang Ying, Yi Aiping, et al. Characteristics of non-chain discharge-pumped pulse HF laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1026–1029. (in Chinese)
- [4] Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Shu Bohong. Measurement of LIDT in fluoride glass irradiated by CW DF laser and analysis of damage mechanism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 272–274. (in Chinese)
- [5] Duo Liping, Jin Yuqi, Yang Boling. Test Diagnosis Technology for Gas Flow Chemical Laser [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [6] Otto W F, Lewis J T, Bartolotta C S, et al. An automated gain measurement system for high-energy chemical lasers[C]// SPIE, 1978, 134–138.
- [7] Duo Liping, Min Xiangde, Sun Yizhu, et al. Study of 2D small-signal gain for a supersonic COIL by a scanning mirror [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(4): 385–388. (in Chinese)
- [8] Tate R F, Hunt B S, Helms C A, et al. Spatial gain measurements in a chemical oxygen iodine laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(9): 1632–1636.
- [9] Tang Litie. Technique of measuring the average small signal gain and saturation photic intensity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S3): 339–341. (in Chinese)
- [10] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, et al. Laser Principle [M]. Beijing: National Defense and Industry Press, 2004. (in Chinese)