

燃烧驱动连续波 DF 化学激光器的输出光谱*

陈金宝 赵伊君 刘泽金 舒柏红

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 利用光栅扫描记录方法测量了不同气流参数条件下,某燃烧驱动连续波 DF 化学激光器的输出光谱,将测量结果和数值计算结果进行了比较和分析。

关键词 激光器, 激光光谱, 燃烧

分类号 O43

Spectrum of Combustion-driven DF Chemical Lasers

Chen Jinbao Zhao Yijun Liu Zejin Shu Bohong

(Department of Applied Physics, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract The output spectrum of the combustion-driven CW DF chemical lasers with different gas flow parameter is measured by the grating scanning method. Compared with the result of numerical calculation, the experimental result is analyzed.

Key words lasers, laser spectrum, combustion

连续波 DF 激光器输出光束的谱线组成(谱线成分及其相对强度)是该激光器的一个重要参数。一方面,它是外场传输中决定大气吸收衰减的因素^[1];另一方面,输出光束的谱线组成又是诊断激光器运转状态的一个重要手段,反之在某种程序上又可以通过调节激光器的运转状态来改变其输出光束的谱线组成^[2]。因此,光谱测量是 DF 激光器的一个常规测量科目,可以为正确评估高能 DF 激光器外场应用性能和优化激光器设计参数提供依据。本文的研究中,利用光栅扫描记录方法,测量了某 DF 激光器的输出光谱,将测量结果和相应条件下的数值计算结果进行了比较和分析。

1 DF 激光光谱测量实验

1.1 光谱测量实验装置及测试过程

待测燃烧驱动连续波 DF 激光器的结构见图 1,其氧化剂喷管和燃料喷管为交替排列的二维狭缝 LAVAL 喷管,光腔采用折叠非稳腔,输出为环状空心光束(理想情况下为轴对称空心光束)。DF 激光谱线组成的测量装置见图 2,利用中断反射镜 M4 的透射光,使之聚焦后进入光栅摄谱仪,凹镜 M10 和 M11 空间位置为上下列置。刻线为 180 线/mm 的反射式平面衍射光栅由步进电机驱动,由激光器的加氙信号同步触发,光栅起始角度设定为 18.84°;步进电机每转一周,步数为 240 步,时间 t_0 为 0.13s,相应的光栅扫描角度为 1°。摄谱仪出口狭缝处经色散后的 DF 激光由 HgCdTe 探测器 1[#] 探测,探测器 2[#] 用于监测 DF 激光器功率随时间的变化,探测器前加有浸没透镜,其输出的电信号经放大及 A/D 转换后由计算机采集。

1.2 谱线波长的确定

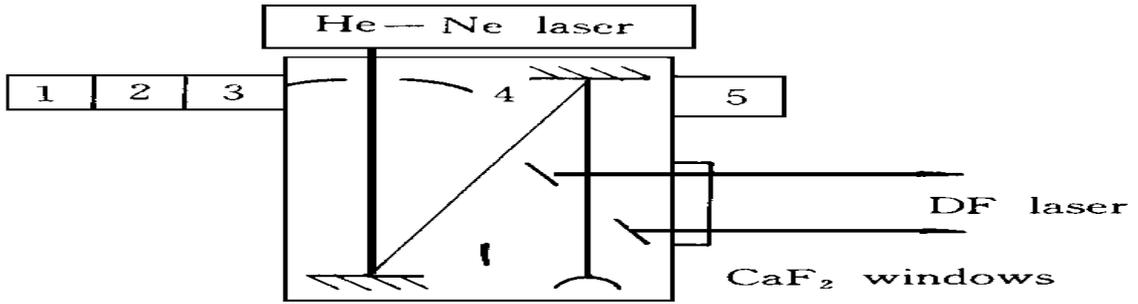
谱线波长 λ 由光栅角度决定,对刻线间距为 d 的平面衍射光栅,光束入射角 θ 与出射角 θ 满足光栅方程^[3]

$$\sin\theta_i + \sin\theta = k\lambda/d \quad (1)$$

k 为衍射级次,实验测得的是一级衍射,由于凹镜、光栅、出口狭缝在空间上是上下列置,有 $\theta = \theta$,光栅起始角度为 θ_n ,扫描时间为 t 时,光栅角度 θ 为

* 1998 年 7 月 10 日收稿

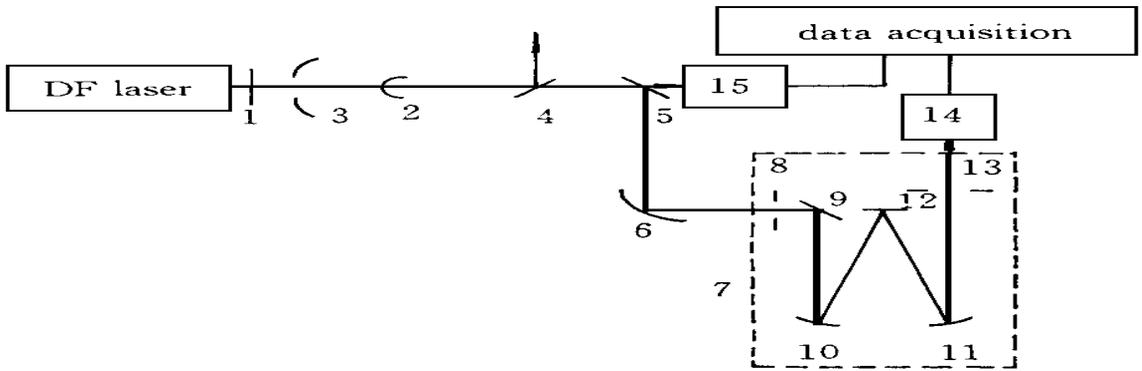
第一作者: 陈金宝,男,1970 年生,博士



- 1. gas control system 2. combustor 3. nozzle array
- 4. unstable resonator 5. pressure recovery system

图1 燃烧驱动连续波DF化学激光器结构示意图

Fig. 1 Structure of combustion-driven CW DF chemical laser



- 1. power meter 2, 3. expanding telescope 4, 5. beam splitter
- 6. concave mirror $f = 4.8\text{m}$ 7. spectrograph 8. entrance slit
- 9. reflective mirror 10, 11. concave mirror $f = 1\text{m}$ 12. diffraction grating
- 13. exit slit 14, 15. HgCdTe detector 1[#], 2[#]

图2 DF激光光谱测量装置

Fig. 2 Setup of measuring DF laser spectrum

$$\theta = \theta_1 + \frac{t}{t_0} \tag{2}$$

所以

$$\lambda = 2d \sin\left(\theta_1 + \frac{t}{t_0}\right) \tag{3}$$

实验中，光栅扫描角度从 18.84 到 21.84°；由上式计算得到，对应谱线波长扫描范围 3.588 ~ 4.134 μm 。

1.3 谱线相对强度

探测器 1[#] 和 2[#] 的输出信号分别为 V_1, V_2 ，二者均由背景噪声 V_b 和光响应信号 V_s 两部分组成

$$V_1 = V_{1b} + V_{1s} \tag{4}$$

$$V_2 = V_{2b} + V_{2s} \tag{5}$$

V_1 的每个输出脉冲代表一条谱线，脉冲的峰值位置为谱线位置，峰值大小表示谱线强度，所以每条谱线功率占激光总功率的比例（谱线相对强度） g_i 为

$$g_i = \frac{V_{1si}/V_{2si}}{(V_{1i}/V_{2i})} \tag{6}$$

式中 V_{1si}, V_{2si} 为每个脉冲峰值位置对应的光响应信号幅度。

2 光谱测试结果及分析

2.1 输出光谱的测量结果

常规实验条件下,对 DF 激光器输出光谱进行了四次有效测量,四次测得的谱线成分和相对强度不能逐次严格重复,反映了光腔内各跃迁谱线激射过程之间的竞争,但除个别支谱线外,其它谱线存在的重复性较好,因此有理由相信,这些谱线在某一时刻应是同时存在。图 3 (a) 给出了常规实验条件下,DF 激光器输出光谱测量值(四次实验数据的平均值)。为研究气流参数对输出光谱的影响,实验过程中调整激光器的入口气流参数,图 4 (a)、图 5 (a) 分别给出了稀释剂 He 流量增大到原来的 1.5 倍和各气体流量均增大到原来的 1.2 倍两种情况下激光器的输出光谱。表 1 给出了不同气流参数时激光器输出光谱中各振动谱带所占功率百分含量的测量值。

2.2 输出光谱的理论计算

利用燃烧驱动连续波 DF 化学激光器二维数值计算模型^[4],计算得到不同实验条件下的 DF 激光器输出光谱理论值,结果见图 3 (b)、图 4 (b) 和图 5 (b),各振动谱带功率百分含量的理论值见表 1。

表 1 输出光谱中各振动谱带功率百分含量

Tab. 1 Power percent of each vibration brand in the output spectrum

Vibration band	Power percent of each vibration band (%)					
	Normal gas parameter		Flow rate of He increases		Flow rates of all gases increase	
	Exiperimental Value	Theoretical Value	Exiperimental Value	Theoretical Value	Exiperimental Value	Theoretical Value
V(1-0)	28.0	28.2	27.6	28.1	42.7	28.3
V(2-1)	32.8	34.2	34.5	33.8	42.4	34.6
V(3-2)	34.7	32.0	33.2	32.3	14.9	31.7
V(4-3)	4.5	5.6	4.7	5.8	0.0	5.4

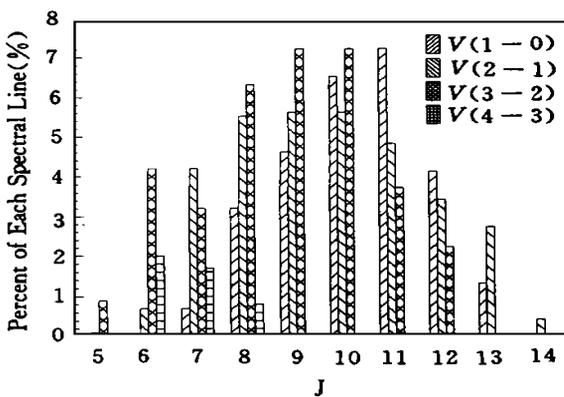


图 3 (a) 常规实验条件下输出光谱测量值

Fig. 3 (a) The measured spectrum in condition of normal experiment

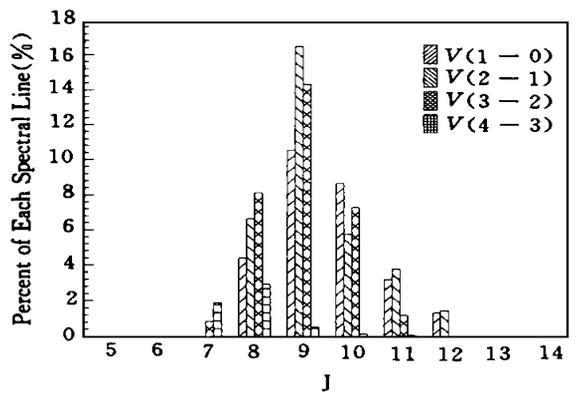


图 3 (b) 常规实验条件下输出光谱计算值

Fig. 3 (b) The calculated spectrum in condition of normal experiment

2.3 结果分析

常规实验条件下,从图 3 可见: 1) 测得的 DF 激光器输出光谱只存在 P 支跃迁谱线,不存在 R 支跃迁谱线,这与理论预测一致,由于泵浦反应产生的增益介质粒子数分布是振转态部分反转,而 R 支跃迁只有在全粒子数反转时才能出现; 2) 对各振转谱线相对强度的预测,数值计算结果只给出了大致信息,由于计算模型假设每个振动态的各转动能级上的粒子数服从 Boltzmann 分布,即与增益介质混

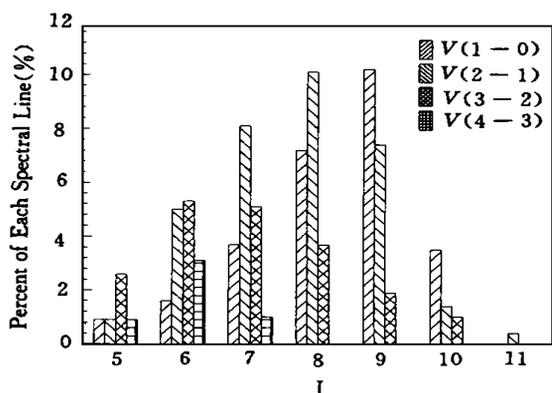


图 4 (a) 稀释剂流量增大时输出光谱测量值

Fig. 4 (a) The measured spectrum when He flow rate increases

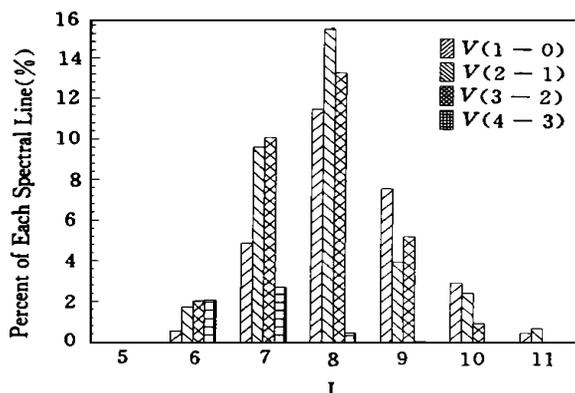


图 4 (b) 稀释剂流量增大时输出光谱计算值

Fig. 4 (b) The calculated spectrum when He flow rate increases

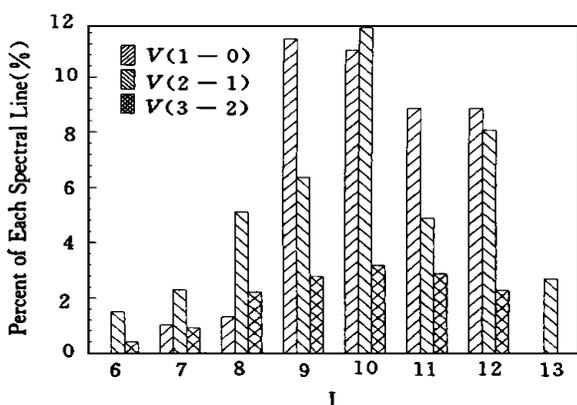


图 5 (a) 各种气体流量增大时输出光谱测量值

Fig. 5 (a) The measured spectrum when the flow rates

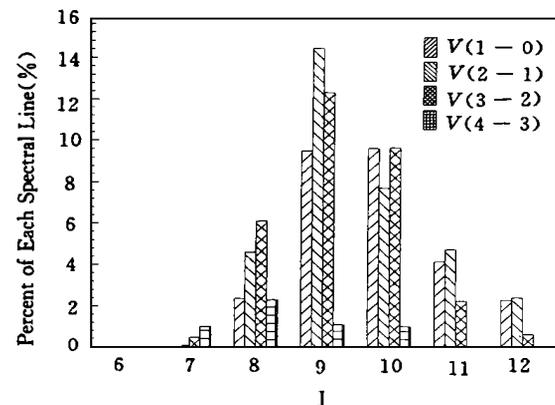


图 5 (b) 各种气体流量增大时输出光谱计算值

Fig. 5 (b) The calculated spectrum when the flow rates of all sorts of gases increase

合气体处于热平衡，各振动带内同一时刻只允许增益最大的一支谱线产生跃迁，结果导致各振动谱带只产生一个强跃迁，主要由混合气体的温度决定。一般说来，在增益介质不产生受激发射时，在现有工作条件下，该假设成立。然而，在有强烈受激发射产生激光的情况下，由于受激发射与引起转动弛豫的各种效应间相互竞争，结果可以导致各振动能级上转动粒子数非平衡分布，实测结果中各振动带多支谱线同时激射证实了这一点；3) 考察输出光谱测量结果，在列出的 $P_4(7)$ 、 $P_3(8)$ 、 $P_2(9)$ 、 $P_1(10)$ 和 $P_4(8)$ 、 $P_3(9)$ 、 $P_2(10)$ 、 $P_1(11)$ 的功率值中，以及较小程度上在其它相关跃迁之间，可以看到能级有关谱线之间的级联。而这样的效应在理论计算结果中看不到，在转动热平衡分布的条件下，各振动带上只有一个转动跃迁才可能具有最佳的增益分布，相应转动量子数 J 的值由增益介质混合气体的温度决定。实验条件下， $J = 9$ 是这个最佳的 J 值，但 $V(4-3)$ 谱带最佳 J 值向下漂移，这归因于 $P_4(J)$ 激射的早期关闭。由于 DF 激光器的泵浦反应中， $V = 4$ 能级只受到微弱激励，所以 $V(4-3)$ 谱带增益较小，微弱的部分反转也很快消失。对增益介质而言，由于上游气体比下游气体温度低，由 Boltzmann 分布，较低的温度会导致较低的最佳 J 值，所以 $V(4-3)$ 振动带最佳 J 值为 8。实测光谱中 $V(1-0)$ 谱带最强谱线从 $P_1(9)$ 到 $P_1(11)$ 强列向上漂移，正如上面提到的， $P_1(11)$ 经级联与强激射谱线 $P_2(10)$ 有关，所以这种漂移意味着级联产生的效应；4) 表 1 中的数据表明，各振动谱带总功率百分含量与理论值基本吻合，表明数值计算模型给定的增益介质粒子数在各振动产物态上的分布与实际情况一致。

改变激光器的人口气体流量，从图 4 和图 5 可见：稀释剂流量增大时，输出光谱整体朝低 J 值方向移动，各振动谱带具有最大相对强度的谱线对应的转动量子数减小；各种气体流量按比例增大时，输出光谱整体朝高 J 值方向移动，尽管各振动谱带具有最大相对强度的谱线对应的转动量子数无明显变化，但 $J = 6, 7, 8$ 的谱线相对强度减小， $J = 12$ 的谱线相对强度明显增大。这与理论结果完全一致，由

于稀释剂流量增大使得腔内温度降低, 各振动谱带上具有最佳增益的激射跃迁的 J 值减小, 所以输出光谱整体朝低 J 值方向移动; 相反, 各种气体流量按比例增大时, 腔内温度上升, 各振动谱带上具有最佳增益的激射跃迁的 J 值增大, 所以输出光谱整体朝高 J 值方向移动。

表 1 中的数据表明: 与常规实验条件下的测量结果相比, 各气体流量按比例增大时, DF 激光器的输出功率中 $V(3-2)$ 振动谱带所占百分含量的测量值明显减小, 而 $V(2-1)$ 、 $V(1-0)$ 振动谱带所占百分含量增大。这是由于气体流量增大时, 腔内温度和压力上升, 碰撞去激活加剧, 导致高振动态上的粒子数迅速减少, 所以高振动谱带有效激射减少, 输出功率所占比例减小, 而低振动谱带输出功率所占比例相对增大。这一点在理论计算结果中看不出来。说明理论计算模型中对碰撞去激活速率的考虑还不够充分, 尤其是温度较高时, 对高振动能级上 DF 分子的碰撞去激活速率有可能偏小, 使得气体流量增大时, 数值计算结果中各振动谱带输出功率百分含量基本不变。

3 结论

(1) 实验上利用光栅扫描记录方式首次测得了常规实验条件下, 某燃烧驱动连续波 DF 激光器的输出光谱, 测量结果表明该激光器的输出功率在各振转谱线上的分布比较分散, 这在实际应用中存在一定缺陷, 所以应通过改变气流配比、喷管结构等激光器参数以优化激光器的输出光谱, 使之更适于实际应用;

(2) 理论上用二维数值模型计算了实验条件下 DF 激光器的输出光谱, 与实验值进行了比较, 结果表明: 常规实验条件下, 理论计算得到的激光器输出光谱最强线与实验值一致, 各振动谱带总功率百分含量的实测结果与理论值基本符合, 但实验发现, 各振动谱带存在多谱线同时激射以及相关谱线间存在级联效应, 反映了数值计算模型中转动平衡分布假设存在一定的局限性;

(3) 实验研究了激光器入口气流参数对其输出光谱的影响, 测量结果表明: 稀释剂流量增大时, 输出光谱整体朝低 J 值方向移动; 各种气体流量按比例增大时, 输出光谱整体朝高 J 值方向移动, 这与理论计算结果一致。但实验发现各种气体流量按比例增大时, 输出光谱中高振动谱带所占功率百分含量比例减小, 反映了数值计算模型中对碰撞去激活速率的考虑还不够充分;

(4) 光谱测量方法有待进一步改进, 需建立一套多通道光电记录装置来记录全谱线的强度随时间的变化, 此装置可用多个探测器同时记录经光栅色散后的波长不同的激光束, 来取代现有的光栅扫描记录方式。因为光栅扫描记录方式反映的是不同时刻谱线强度分布而不是同一时刻, 而要反映激光器运转的真实情况和满足实际应用的需要, 显然应该记录所有谱线在整个出光期间的强度变化。

参考文献

- 1 宋正方. 应用大气光学基础. 北京: 气象出版社, 1990
- 2 Kwok M A. Development of the MESA Spectroscopy Experiment. AD-77465, 1974
- 3 格罗斯 R W F, 博特 J F. 化学激光手册, 北京: 科学出版社, 1987
- 4 Egorov Y, Navier-Stokes Modeling of 2D and 3D Reactive Nozzle Array Flow on the Basis of Compressibility Scaling Method. '94 Stuttgart, Germany, 1994: 815~825
- 5 Sentman L H. Appl. Opt. 1978, 17 (4): 2244