

文章编号: 0258-7025(2010)03-0636-04

一种可用于 HF/DF 化学激光器流场温度测量的方法

罗 威 袁圣付 陆启生 王红岩 张煊喆 周 琼

(国防科学技术大学光电学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 介绍了一种命名为吸收光谱测温法的方法, 结合激光束气体吸收理论, 对 HF/DF 化学激光器热平衡流场的吸收系数与温度关系进行了理论分析。利用电激励连续波选线 HF 激光器的 $1p9, 1p8$ 两条单谱线作为探测光源, 实验测量了一台电激励连续波 HF/DF 化学激光器增益区下游流场的透射率随注入氢气流量变化的曲线, 推测出 HF 气体流量, 并结合流场压强等其他数据, 通过吸收系数公式计算出加入过量氢气后流场的温度变化范围。对计算结果及误差来源进行了分析。该方法可用于气流激光器、发动机燃烧室等的气体流场温度测量。

关键词 化学激光器; 流场温度测量; 吸收光谱; 选线 HF 激光器; 透射率

中图分类号 TN248.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0636

A Method of Measuring Flow Field Temperature for HF/DF Chemical Laser

Luo Wei Yuan Shengfu Lu Qisheng Wang Hongyan Zhang Xuanzhe Zhou Qiong

(College of Opto-Electric Science and Engineer, National University of Defense Technology,

Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract This article introduced a method of measuring temperature which was named absorption spectrum temperature-measurement method; the relationship between the absorption coefficient and the temperature of thermal equilibrium flow field for HF/DF chemical laser was analyzed by the theory of gas absorption. Used the $1p9$ and $1p8$ spectral line of a discharge driving continuous wave (CW) single-line HF laser as detect light source, the transmittance of the flow field that behind the gain field of a discharge driving CW HF/DF laser was experimental measured, which changed with the flow rate of injected hydrogen gas. The flow rate of HF gas was estimated, combined with the pressure of flow field and other data, the temperature variety scope of the flow field was computed by the absorption coefficient formula. The result and error source were analyzed. This method can be used for measuring gas flow field temperature of gas flow laser and engine combustor.

Key words chemical laser; flow field temperature-measurement; absorption spectrum; single-line HF laser; transmittance

1 引言

化学激光器属于高能激光器的重要发展领域。为优化激光器器件, 提高激光器性能, 对流场参数等进行测试诊断十分必要^[1]。温度是影响化学激光器性能的重要参数, 对 DF/HF 化学激光器来说, 为了获得有效激发, 光腔中的气体应该维持在比较低的

温度^[2]。在一定范围内, 温度越低, 激光器的效率越高, 小信号增益越大^[3]。温度还是影响输出谱线的重要因素之一^[4]。DF/HF 化学激光器的流场中存在化学反应, 一般具有压力低、滞止温度高、气体的腐蚀性强等特点^[2], 使得许多常规的测量手段难以发挥作用。

收稿日期: 2009-04-15; 收到修改稿日期: 2009-06-05

基金项目: 国防预研基金资助项目。

作者简介: 罗 威(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: luowei8786@163.com

导师简介: 陆启生(1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术、激光与物质相互作用和非线性光学等方面的研究。E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn

光学测温法具有非接触测量、响应速度快、抗电磁干扰等优点,为化学激光器流场温度测量提供了新的手段。目前比较常见的几种光学测温技术有基于 CCD 的光谱辐射测温技术^[5,6]、激光诱导荧光光谱法^[7]、可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)测温技术^[8,9]、相干反斯托克斯拉曼散射光谱法(CARS)^[10]、激光多普勒线型测温技术^[1]、全息干涉测量技术^[11]等,各种方法均有其各自的优缺点和一定的适用范围。我们在进行 HF/DF 化学激光器的 F 原子流量测量工作时^[12],发现了一种新的可用于化学激光器流场温度测量的光学测温方法,将其命名为吸收光谱测温法,即通过实验测量气体流量、压强、对激光束的透射率等参数,利用吸收系数公式计算得到气体温度的方法。使用此方法推算出了一台电激励连续波 HF/DF 化学激光器增益区下游的温度变化范围。

2 理论分析

激光束通过均匀气体介质时,有

$$A = \exp[\pm \alpha(\omega)L], \quad (1)$$

式中 $\alpha(\omega)$ 为增益(吸收)系数,增益时为 $+\alpha(\omega)$,而吸收时为 $-\alpha(\omega)$,本文仅讨论吸收的情况。 L 为吸收区长度, $A = I/I_0$, 为透射光强 I 和入射光强 I_0 之比,表示透射率。吸收系数 $\alpha(\omega)$ 与探测谱线、温度及气体分子密度等有关。

用 $\omega(\nu, J, m)$ 来表征双原子的跃迁谱线, ν 和 J 分别为下能态的振动和转动量子数。对于 P 支跃迁,参数 $m = -1$; 对于 R 支跃迁, $m = +1$ 。对于电激励连续波 HF/DF 化学激光器,仅存在 P 支跃迁。除增益区外的其他流场范围内, HF 分子基本处于基态(激发态弛豫时间小于 10^{-5} s)。因为工作介质具有压强较小、温度较高、流速快等特点,其谱线可认为仅有多普勒加宽。经过碰撞弛豫过程后,工作介质处于局部热平衡状态,假设 HF 分子满足玻尔兹曼平衡分布。仅在谱线中心处求吸收值时,基态 HF 分子的吸收系数可表示为^[13]

$$\alpha(\omega) = \frac{hc}{4\pi} N_A \rho (2J+1) \left(\frac{W}{2N_A \pi kT} \right)^{1/2} \times B(0, J, -1) \frac{1}{Q_{\text{rot}}^{(0)}} \exp\left(-\frac{hc}{kT} E_{0,J}\right), \quad (2)$$

式中 h 为普朗克常数, c 为光速, N_A 为阿伏伽德罗(Avogadro)常数, ρ 为单位体积内 HF 分子的物质的量, W 为 HF 的摩尔质量, k 为玻尔兹曼常数, T 为气体温度, $B(\nu, J, m)$ 为爱因斯坦吸收系数, $Q_{\text{rot}}^{(0)}$

为转动配分函数, $E_{\nu, J}$ 为态 ν, J 的转动能。

由理想气体状态方程 ρ 可表示为

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad (3)$$

式中 p 为 HF 气体压强, R 为普适气体常数。

由实验测量探测激光通过基态 HF 分子吸收区的透射率 A , 结合流场总压强、各路气体流量等数据,分析得到 HF 分子流量及压强 p , 并利用其他已知条件,由(1)~(3)式计算出了吸收区的流场温度 T 。

3 实验方案及结果

待测激光器为一台电激励连续波 HF/DF 化学激光器,其基本工作原理为: NF_3 和主 Ar 气注入放电管,经直流辉光放电击穿后分解出 F 原子, F 原子在增益发生器内与注入的 H_2 发生反应: $\text{F} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HF} + \text{H}$, 生成振动激发态的 HF 分子,获得粒子数反转,光腔用于提取增益,激发激光方向与气流方向垂直,副 Ar 气从放电管末端注入以提高激光器性能, N_2 从腔镜处注入以保护腔镜免受腐蚀,提取完功率后的废气在热交换管冷却后,经真空管道由真空泵抽走,放电管、增益发生器、热交换管均设有水冷管道。探测光源为一台电激励连续波 HF 选线激光器,探测激光垂直入射吸收气体介质。探测光源的工作原理与基本构造与待测激光器基本相同,即气体工作介质的温度、压强、流速均相差不大,所以探测激光谱线与气体吸收谱线在频率中心、多普勒加宽及频移等方面均能很好地吻合,因而选用选线 HF 激光器作为探测光源在谱线匹配方面是优于可调谐二极管激光器的^[9]。

实验光路简略模型如图 1 所示。电激励连续波 HF 选线激光器作为探测光源 1,探测光经斩波器 2

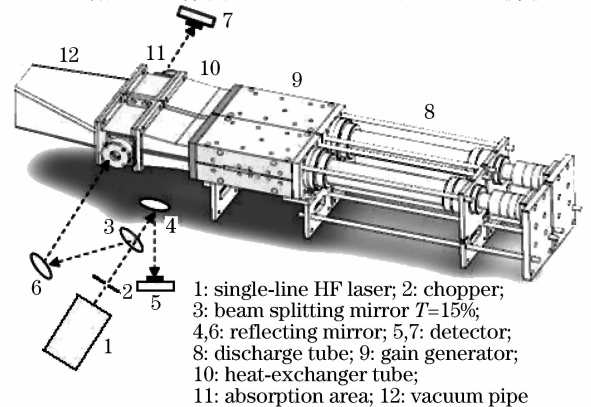


图 1 实验光路模型简图

Fig. 1 Model graph of experimental optical path

后传输到 $T=15\%$ 的分束镜 3, 透射光经反射镜 4 后传输到 1 号探测器 5, 作为参考信号; 反射光经反射镜 6, 吸收区 11 后传输到 2 号探测器 7, 测量吸收信号。吸收区 11 位于待测激光器放电管 8, 增益发生器 9, 热交换管 10 之后, 连接真空泵的真空管道 12 之前, 是为实验专门加入的零件, 采用硒化锌镜片作为红外窗口, 吸收区处 HF 分子已基本回落到基态。

分别选用选线 HF 激光器的 $1p9, 1p8$ 两条谱线作为探测光源, 由小到大调节待测激光器 H_2 流量, 并保持 NF_3 及其他工作气体的流量不变, 测量探测光经吸收区后的功率变化。在实验光路传输过程中, 探测光功率经镜面损耗及大气吸收后达到吸收区时衰减为毫瓦量级。各路工作气体 (H_2 除外) 流量均参照正常工作时的数据。

两条谱线透射率与氢气流量关系的对比曲线如

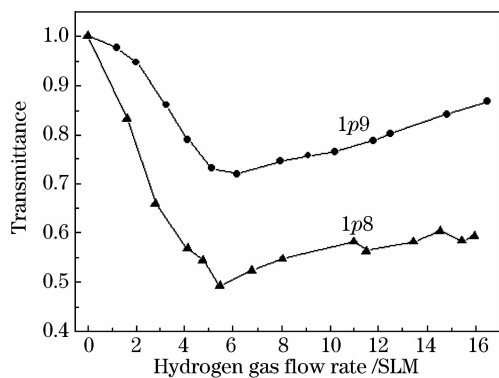


图 2 不同探测谱线时的透射率曲线

Fig. 2 Transmittance data for different spectra lines

表 1 $1p9, 1p8$ 谱线对应参数及温度变化范围计算值

Table 1 Parameters and calculated temperature range of the $1p9, 1p8$ line

Spectral line	J	$B(0, J, -1) / 10^{13}$ [$cm^2 / (molecule \cdot J \cdot S)$]	$E_{0, J} /$ cm^{-1}	H_2 flow rate range / SLM	Transmittance range	Temperature range / K
$1p9$	9	5.63558	1833.3741	6.16~16.46	0.721~0.869	445~362
$1p8$	8	5.35155	1469.4158	5.45~15.96	0.495~0.595	403~365

比较得到的另一组温度变化范围分别为 3530~5520, 2260~2720 K, 经分析属于不合理值, 原因如下: 1) 待测激光器工作参数基本不变, 探测光源不同谱线对流场温度影响极小, 故由不同探测谱线计算得到的温度范围应基本相同; 2) 加入过量氢气后, 流场温度应随氢气流量增大而减小; 3) 直流辉光放电温度一般较低, 不会达到数千开。

本文中温度测量的主要误差来源于利用 (3) 式计算 ρ 时, 对 HF 分子压强所做的简化假设。由于

图 2 所示。可看出透射率随氢气流量增大先减小后增大, 分析其原因为: 氢气刚加入并逐渐增大时, HF 分子浓度增大, 透射率受 HF 分子浓度增大影响而迅速下降; 当加入过量氢气时, HF 分子浓度保持不变, 因氢气温度较低, 使气流整体温度降低, 故透射率有所增大^[12]。由滴定 HF 吸收法得知, 1 个 NF_3 分子约解离出 1 个 F 原子^[12]。

4 温度范围变化计算

NF_3 的流量为 5.57 SLM (标准状态下 L/min), 故 F 原子 (HF 分子) 的流量约为 5.57 SLM^[12], 其他工作气体注入流量分别为: 主 Ar 为 11.7 SLM, 副 Ar 为 11.3 SLM, N_2 为 9.5 SLM, 过量 H_2 的流量调节范围约 6~16 SLM。HF 的物质的量随 H_2 流量改变而变化, 但因为反应产物成分复杂, 为简化计算, 令 HF 摩尔分数保持为 10%。调节氢气流量时, 光腔处气流压强读数基本不变为 $p_0 = 0.4$ kPa, 吸收区处因为气流通道增大压强应当略小, 计算时忽略了其差别, 采用光腔处的压强数据。由 HF 的物质的量与气流总压强得到吸收区处的 HF 气体分压 $p \approx 40$ Pa。HF 摩尔质量 $W = 0.02$ kg/mol, 吸收区长度 $L = 0.018$ m, 转动配分函数 $Q_{rot}^{(0)} = 0.03381 T^{[13]}$, 各谱线爱因斯坦吸收系数 $B(0, J, -1)^{[13]}$, 转动能 $E_{0, J}^{[13]}$ 的数值, 过量氢气的流量调节范围及对应透射率范围如表 1 所示。代入以上各数值及常数, 由 (1)~(3) 式计算得到透射率随温度变化的数值曲线 (透射率随温度升高先减小后增大), 比较实际测量得到的透射率变化范围得到温度变化范围如表 1 所示。

目前没有其他温度测量结果来进行对比, 此测温方法的误差大小有待在下一步工作确认。

$1p9$ 谱线, $1p8$ 谱线得出的温度范围基本吻合, 但也有一定的差别, 分析其可能原因为: 1) 激光器状态不同。因为激光器每次测量时重新启动, 虽参数基本相同, 但运行状态必然会有所差别, 流场气流温度也会有所变化。2) 氢气流量范围不同。因为气体流量由浮子流量计手动控制调节, 实验中为缩短测量时间, 减少激光器运行成本, 两次测量时氢气

流量采样点并没有刻意调节到一致。3) 透射率测量中引入的误差。

为提高吸收光谱测温法的测量精度,应当提高吸收气体物质的量浓度与透射率测量的精度。在应用于其他领域时,若已知某种气体物质的量浓度,并具备相应波段的单谱线激光器作为探测光源,实验测量及温度计算过程将会更加简单。

此外,因为激光器增益区存在粒子数反转,大部分 HF 分子处于振动激发态,此时探测激光通过时将产生增益,若已知谱线对应上下能级的粒子数分布,对文中公式稍做改动,也可以用吸收光谱测温法对增益区流场温度进行测量。

5 结 论

介绍了一种新的光学测温方法,命名为吸收光谱测温法。利用吸收系数公式,当已知吸收气体分子密度时,只需测量探测激光的透射率,结合其他参数就可以计算出气流的温度。吸收光谱测温法为非接触光学测温方法,实验测量量较少,测量过程相对简单,适用于满足玻尔兹曼平衡分布的流场温度测量。本方法可用于气流激光器、发动机燃烧室等的流场温度测量。

参 考 文 献

- 1 Duo Liping, Yang Bailing. Measurement-Diagnosis Technology of Gas Chemical Lasers [M]. Beijing: Science Press, 2005
多丽萍,杨柏龄 编. 气流化学激光测试诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005
- 2 Shi Jianhua. Investigation on flowfield of combustion driven CW DF/HF chemical laser employing HYLTE nozzle [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. 2~4
施建华. 燃烧驱动 CW DF/HF 化学激光器 HYLTE 喷管流场的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004. 2~4
- 3 Yuan Shengfu, Zhao Yijun, Hua Weihong *et al.*. Dependence of CW DF/HF chemical laser performance on the flowfield parameters [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(5):402~406
袁圣付,赵伊君,华卫红 等. CW DF/HF 化学激光器性能与流场参数的相互关系[J]. 中国激光, 2001, **A28**(5):402~406
- 4 Chen Jinbao, Zhao Yijun, Liu Zejin *et al.*. Spectrum of combustion-driven DF chemical lasers [J]. *J. National University of Defense Technology*, 1999, **21**(3):29~33
陈金宝,赵伊君,刘泽金 等. 燃烧驱动连续波 DF 化学激光器的

- 输出光谱[J]. 国防科技大学学报, 1999, **21**(3):29~33
- 5 Y. Huang, Y. Yan, G. Riley. Vision-based measurement of temperature distribution in a 500-kW model furnace using the two-colour method [J]. *Measurement*, 2000, **28**(3):175~183
- 6 Cao Zhen, Yang Xichen, Zhang Haiming. Application of image processing system based on digital signal processor to temperature field measurement in laser molten pool [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4):1016~1019
曹 震,杨洗陈,张海明. 基于数字信号处理器的图像处理系统在激光熔池温度场检测中的应用[J]. 中国激光, 2009, **36**(4):1016~1019
- 7 Yue Bin, Su Tie, Yu Fuming *et al.*. LIF temperature measurement of arc jet by O₂-laser induced fluorescence [J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2004, **18**(1):84~88
岳 斌,苏 铁,余福明 等. 电弧加热射流 O₂ 激光诱导荧光技术温度测量[J]. 流体力学实验与测量, 2004, **18**(1):84~88
- 8 Wang Jian, Huang Wei, Gu Haitao *et al.*. Gas temperature measurement with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1639~1642
王 健,黄 伟,顾海涛 等. 可调谐二极管激光吸收光谱法测量气体温度[J]. 光学学报, 2007, **27**(9):1639~1642
- 9 Li Ning, Yan Jianhua, Wang Fei *et al.*. Effect of linewidth on measurement of CO₂ by wavelenth modulation absorption spectrometry using tunable diode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10):1567~1572
李 宁,严建华,王 飞 等. 光谱线宽对可调谐激光调制吸收光谱技术测量 CO₂ 浓度的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(10):1567~1572
- 10 Zhang Lirong, Hu Zhiyun, Zhang Zhenrong *et al.*. Temperature measurement in stable combustion field with one-dimensional used CARS [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(12):2035~2038
张立荣,胡志云,张振荣 等. 一维非稳腔空间增强探测 CARS 技术对稳态燃烧场温度的测量[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(12):2035~2038
- 11 Chen Xihui, Jiao Chunyan, Li Junchang. Spatial carrier phase-shifting method to the holographic CT measurement of gas temperature field [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(4):412~414
陈希慧,焦春妍,李俊昌. 空间载波相移法用于全息 CT 测量气体温度场[J]. 激光技术, 2006, **30**(4):412~414
- 12 Luo Wei, Li Wenyu, Wang Hongyan *et al.*. A novel method of measuring fluorine atom flow rate for discharge driven HF/DF chemical laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6):1407~1410
罗 威,李文煜,王红岩 等. 用于电激励 HF/DF 化学激光器的 F 原子流量检测新方法[J]. 中国激光, 2009, **36**(6):1407~1410
- 13 R. W. F. Gross, J. F. Bott. Handbook of Chemical Laser [M]. Yin Houming, Xie Xingbin, Luo Jingyuan Transl.. Beijing: Science Press, 1987. 454~481
R. W. F. 格罗斯, J. F. 博特. 化学激光手册[M]. 尹厚明,谢行滨,罗静远 译. 北京:科学出版社, 1987. 454~481