

光谱测量在化学激光器运转状态诊断中的应用

邹前进^{1,2} 袁圣付¹ 罗威¹ 樊宏杰²

(¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; ² 中国人民解放军 63880 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要 讨论了化学激光器产生激光的粒子数反转条件, 给出了化学激光器反转粒子数浓度差随 J 值的变化情况。指出对于某一振动态存在截止波长量子数 J_0 和最大光谱跃迁量子数 J_m 。通过化学激光器增益系数与光腔静温 T 和上下能级粒子数质量分数比 N_x 关系仿真计算分析, 提出结合激光器光谱测量结果计算 J_0 、 J_m 与光腔静温 T 和上下能级粒子数质量分数比 N_x 变化关系交点以实现化学激光器运转状态诊断的方法。结合实际 HF 化学激光器的光谱测试结果, 给出了化学激光器光腔静温和上下能级粒子质量分数比。

关键词 激光器; 化学激光器; 光谱测量; 光腔静温

中图分类号 TN248.5 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.091401

Application of Spectrum Measurements in Working Status Diagnosis of Chemical Lasers

Zou Qianjin^{1,2} Yuan Shengfu¹ Luo Wei¹ Fan Hongjie²

¹ College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;
² 63880 Unit, People's Liberation Army, Luoyang, Henan 471003, China

Abstract Working conditions of chemical lasers are discussed. The particle number concentration changing with the J values is shown. There are quantum number J_0 of cutoff wavelength and quantum number J_m of maximum spectral transition. The method of working status diagnosis of chemical lasers is proposed by combination of spectrum measuring, the relationships between J_0 , J_m , cavity static temperature T , and the mass fraction ratio of lower level and upper level N_x . The cavity static temperature T and mass fraction ratio of lower level and upper level N_x according with the actual spectrum measurements of HF chemical laser are given.

Key words lasers; chemical laser; spectrum measuring; cavity static temperature

OCIS codes 140.1550;140.3070;140.3430

1 引言

HF/DF 化学激光器具有频谱宽、原则上不需要外界能源供给、激光介质不存在废热沉积等优点在强激光领域,特别是在军事用途上,占有重要地位^[1]。但高功率 HF/DF 化学激光器工作时间一般较短,流场中存在化学反应,且具有压力低、滞止温度高、气体的腐蚀性强等特点^[1,2],使得许多常规的实验测量手段难以发挥作用,因此经常采用数值模拟方法进行研究^[3,4]。但对于某一特定化学激光器,由于结构参数和燃料配比等参数固定,使用软件仿真计算结果的一般变化不大。实际工作过程中,喷管组件受热膨胀等因素会导致光腔静温、增益介质组分质量分数等发生变化。如何快速了解化学激光器流场参数变化情况,对化学激光器操作有重要意义。

本文研究了化学激光器增益系数与光腔静温和上下能级质量分数比 N_x 的关系。结合 HF 化学激光器光谱测量结果,计算得到 HF 激光器光腔静温 T 和上下能级质量分数比 N_x 。研究发现通过观察截止波长量子数 J ,最大光谱增益量子数 J_m 和光谱移动趋势,可以推测化学激光器的光腔状态变化情况。

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-14; 网络出版日期: 2011-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(10974255/A040403)资助课题。

作者简介: 邹前进(1982—),男,硕士研究生,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zylzsunwing@yahoo.cn

导师简介: 袁圣付(1974—),男,副教授,主要从事高能化学激光器方面的研究。E-mail: shengfuyuan_bb@163.com

2 理论分析

2.1 化学激光器粒子数反转

在现阶段占有重要地位的 HF/DF 化学激光器是通过工作分子的振动-转动(V-R)跃迁来实现激光发射的。在双原子分子两个 V-R 能级之间的粒子数反转程度,通常可以定义为^[1]

$$\Delta N_l^u = N_u - \frac{2J_u + 1}{2J_l + 1} N_l, \quad (1)$$

式中 u 为上能级, l 为下能级, N 为粒子数密度, J 为转动量子数。在化学激光器中粒子数密度、增益介质的密度和跃迁分子的质量分数存在关系^[1,2]

$$N = N_A \rho n(v, J), \quad (2)$$

式中

$$n(v, J) = \frac{n(v) g_v}{Q_{\text{rot}}^{(v)}} \exp\left(-\frac{hc E_{v,J}}{k T}\right), \quad (3)$$

$$n(v) = \frac{C_v}{M}, \quad (4)$$

N_A 为阿伏加德诺常数, ρ 为增益介质密度, $n(v)$ 为振动能级 v 千克-摩尔数, h 为普朗克常数, $Q_{\text{rot}}^{(v)}$ 为转动配分函数, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, $E_{v,J}$ 为态 v, J 的转动能, g_v 为 v 能级简并度, C_v 为粒子质量分数, M 为分子量。激光器发生激光跃迁的首要条件是增益大于损耗^[1,2,5], 即(1)式大于零。将(2)~(4)代入(1)式化简可得

$$\Delta N_l^u = \frac{1}{Q_{\text{rot}}^u} \exp\left(-\frac{hc E_u}{k T}\right) - N_x \frac{1}{Q_{\text{rot}}^l} \exp\left(-\frac{hc E_l}{k T}\right) > 0, \quad (5)$$

式中定义 $N_x = C_l/C_u$ 。

由(5)式可知,化学激光器工况与光腔静温 T 和工作分子上下能级粒子质量分数比 N_x 密切相关。对燃烧驱动 HF 激光器 P 支 $v_1 \rightarrow 0$ 进行计算。取 $T = 400$ K, $N_x = 1.2$, 计算得到 ΔN_l^u 随转动量子数 J 的变化趋势,如图 1 所示。粒子数浓度差 ΔN_l^u 呈现从负值到正值,先增加至最大值后减少,最后趋近于零。由于低 J 值对应于短波方向,所以对于某一振动态跃迁一定存在短波方向的截止波长量子数 J_0 。粒子数最大浓度差 J 值则对应光谱支最大强度跃迁量子数 J_m 。

2.2 光谱增益与静温和上下能级粒子质量分数比的关系

对于 HF/DF 化学激光器基频谱线的增益系数可表示为^[5~9]

$$\alpha(\nu, J, -1) = \frac{h N_A}{4\pi} \omega(\nu, J, -1) \varphi B(\nu, J, -1) \frac{\rho(2J+1)}{M_{\text{DF}}} C_{v+1} \times \left[\frac{1}{Q_{\text{rot}}^{v+1}} \exp\left(-\frac{hc E_{v+1, J-1}}{k T}\right) - \frac{N_x}{Q_{\text{rot}}^v} \exp\left(-\frac{hc E_{v, J}}{k T}\right) \right], \quad (6)$$

式中 $B(\nu, J, m)$ 为爱因斯坦吸收系数, $\omega(\nu, J, -1)$ 为波长, φ 为线型函数。燃烧驱动 HF/DF 化学激光器光腔压力一般只有几百帕,所以谱线加宽主要为 Doppler 加宽^[10,11]。本文线型函数取 Doppler 加宽极限情况。

图 2 给出了光腔静温为 332 K 条件下,归一化增益随 N_x 的变化情况。图 3 给出了工作分子上下能级粒子质量分数比 $N_x = 1.198$ 条件下,归一化增益随 T 的变化情况。由(6)式、图 2 和图 3 可知:化学激光器光谱谱线增益与光腔静温 T 、工作分子上下能级粒子质量分数比 N_x 存在一一对应关系。即短波方向的截止波长量子数 J_0 、光谱最大强度跃迁谱线量子数 J_m 与光腔静温 T 、工作分子上下能级粒子质量分数比 N_x 分别存在单值变化关系。

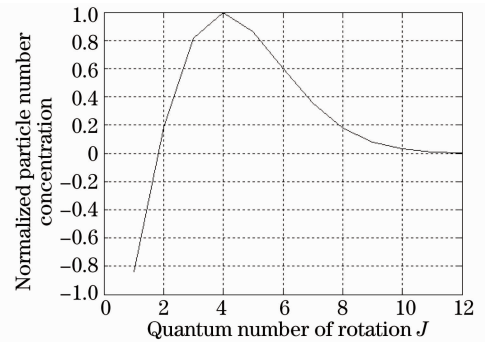
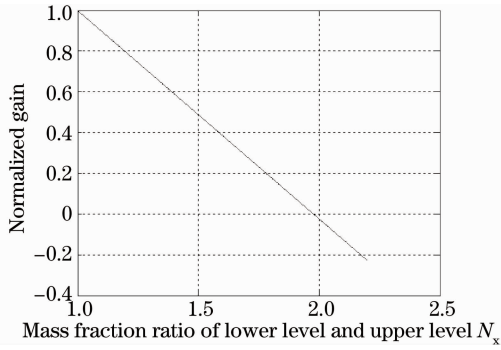
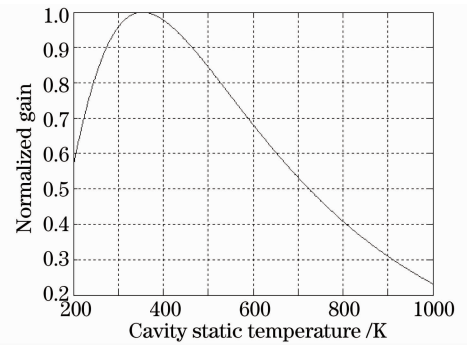


图 1 粒子数浓度差随转动量子数 J 变化示意图

Fig. 1 Variation of the particle number concentration with J

图2 特定温度下归一化增益随 N_x 变化趋势图Fig. 2 Variation of the normalized gain with N_x in a certain T 图3 特定 N_x 下归一化增益随 T 变化趋势图Fig. 3 Variation of the normalized gain with T in a certain N_x

3 光谱测量

试验中采用德国 Tensor37 型傅里叶光谱仪,对一台 CW HF 激光器进行了光谱测量,光谱仪分辨率设定为 3 cm^{-1} 。对同一燃料配比进行三次光谱测量,激光器光轴为喷管下游 15 mm,其光谱测试结果如图 4 所示。

由光谱测量结果可知:对于 1P 支光谱:1P5 光谱支可以认为截止波长,1P6 光谱支认为最大增益光谱。对于 2P 支光谱由于 2P4 光谱能量较小被测量设备展宽光谱后湮没于噪声中,因为通过的提高仪器分辨率的可以测试到了 2P4 光谱,但由于化学激光器工作时间较短限制了更高分辨率光谱测量。

4 仿真计算

在仿真计算中增益介质气体密度、上能级粒子质量分数采用 fluent 仿真结果进行代入结算。根据(6)式,采用仿真计算得到 HF 激光器 $v_1 \rightarrow 0$ 跃迁下 J_0, J_m 与转动温度 T 、下上能级粒子质量分数比 N_x 关系,如图 5 所示。由上可知,取 $J_0=4, J_m=5$,由图 5 得到光腔静温约为 375 K, N_x 约为 1.83。对于其他振动-转动态的跃迁可以采用类似方法来分析处理。

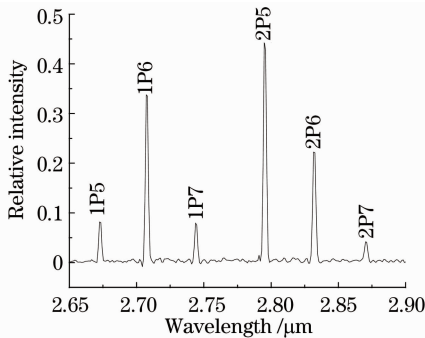
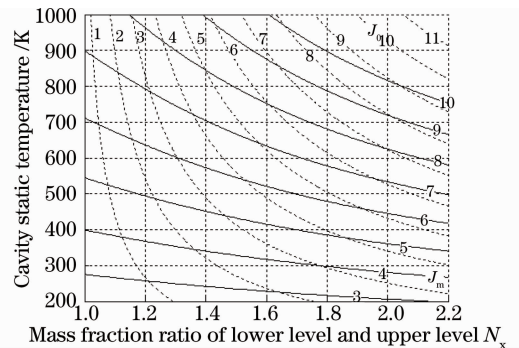


图4 CW HF 激光器光谱测试结果图

Fig. 4 Spectrum of a CW HF laser

图5 $v_1 \rightarrow 0$ 跃迁下 J_0, J_m 与转动温度 T 、下上能级粒子质量分数比 N_x 关系图Fig. 5 Relationships between J_0, J_m and T, N_x of $v_1 \rightarrow 0$

对于某一固定化学激光器,存在最佳工作状态和最佳光轴位置。当激光器工作在最佳工作状态时其功率输出可以达到最佳值。但化学激光器在实际工作的过程中,由于光腔温度变化、供气设备误差等,使得化学激光器输出功率发生波动。对于化学激光器,由于测量手段的限制现阶段无法对其光腔温度、粒子数分布等参数进行直接测量,实际情况下操作人员多数根据经验进行激光器气流参数调整,存在一定的偶然性。在实际光谱测量过程中通过监测截止波长量子数 J_0 、最大光谱增益量子数 J_m 的变化趋势和整个光谱的移动趋势情况,可以实现对化学激光器状态的控制。在化学激光器实际工作过程中作为燃料的 H_2 气是过量的,

多余的 H_2 气可以增加混合程度和调节光腔温度^[1,2],所以在其他气流参数不变的情况下,光腔温度变化趋势与 H_2 量变化趋势相反。

对于某一化学激光器,以其标准 H_2 气输入量为标准量。试验中分别采用 0.8 倍标准量 H_2 气、标准量 H_2 气和 1.4 倍标准量 H_2 气条件进行光谱测量,不考虑信噪比,取各谱线所在位置测量值为此光谱强度值,并对同一条件下测量到的光谱进行多幅平均,各光谱成分百分比分布如表 1 所示。

表 1 不同 H_2 气情况下光谱成分百分比分布

Table 1 Percentage of spectrum under different amount of H_2 gas

Spectrum	1P5	1P6	1P7	2P4	2P5	2P6	2P7
H_2 of 0.8 times	12.61591	25.74335	1.023893	2.966361	42.9405	13.11431	1.595677
H_2 of standard amount	7.326101	27.25846	4.925218	0.274454	39.15088	17.91719	3.14769
H_2 of 1.4 times	6.388145	29.28951	6.369259	0.189418	36.8635	16.53257	4.367603

由表 1 可知,在 0.8 倍标准量 H_2 气情况下,化学激光器 1P5 和 2P4 明显增大,且整个光谱成分向短波方向移动,说明截止波长量子数 J_0 存在减少趋势,由图 5 知此时化学激光器光腔静温升高,需要增加 H_2 气或其他稀释气体来降低光腔工作温度;而在 1.4 倍标准量 H_2 气情况下,化学激光器 1P5 和 2P4 光谱成分下降,1P7 和 2P7 光谱成分增加,同时对比于 1.4 倍标准量 H_2 气 0.8 倍标准量 H_2 气情况,光谱成分分布明显向长波移动, J_0 存在增大趋势,由图 5 知此时化学激光器光腔静温降低,需要减少 H_2 气或者其他稀释气体来提高光腔工作温度。所以通过光谱仿真计算可以优化化学激光器的相关操作。

5 结 论

本文讨论了化学激光器激光产生条件随 J 值的变化规律,结合化学激光器增益系数公式,得到了增益系数与光腔静温 T 和下上能级质量分数比 N_x 的关系。结合实际 HF 化学激光器光谱测量结果,仿真计算得到了实际 HF 激光器光腔静温 T 和下上能级质量分数比 N_x 。通过观察截止波长量子数 J_0 、最大光谱增益量子数 J_m 和整个光谱的移动趋势的变化情况,可以推测化学激光器的光腔状态变化情况,对化学激光器操作有实际意义。

参 考 文 献

- R. W. F. Gross, J. F. Bott. Handbook of Chemical Laser[M]. Beijing: Science Press,1987. 453~483
R. W. F. 格罗斯, J. F. 博特. 化学激光手册[M]. 北京: 科学出版社, 1987, 453~483
- I. A. Fedorov. Continuous Wave Hydrogen Fluoride and Deuterium Fluoride Chemical Lasers[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2010. 128~135
I. A. 费德洛夫. 连续波氟化氢和氟化氘化学激光器[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2010. 128~135
- Jun Sung Park, Seung Wook Beak, Doyoung Byun. Variation of population inversion and gain characteristics with D2 injection angle in DF chemical laser cavity[J]. *Int. J. Heat. Mass Tran.*, 2008, **51**(1-2): 361~377
- Jun Sung Park, Seung Wook Beak. Numerical study of base effects on population inversion in DF chemical laser cavity[J]. *Int. J. Heat. Mass Tran.*, 2006, **49**(21-22): 4043~4057
- Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Principle of Lasers[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2000. 172~177
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 172~177
- Yuan Shengfu. Theoretical Design of Latest Gain Generator for Continuous Wave DF/HF Chemical Lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002. 34~35
袁圣付. 连续波 DF/HF 化学激光器新型增益发生器的理论设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002. 34~35
- Luo Wei, Yuan Shengfu, Lu Qisheng *et al.*. A method of measuring flow field temperature for HF/DF chemical laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 636~639
罗 威, 袁圣付, 陆启生 等. 一种可用于 HF/DF 化学激光器流场温度测量的方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 636~639
- Wang Hongyan, Yuan Shengfu, Li Qiang *et al.*. Chosing cavity axis for a discharge driven CW line-selected HF/DF chemical laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **18**(8): 1257~1260

- 王红岩, 袁圣付, 李 强 等. 电激励连续波 HF/DF 选线化学激光器光轴的选择[J]. 强激光与粒子束, 2005, **18**(8): 1257~1260
- 9 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
- 10 I. A. Fedorov, Y. P. Maksimov, N. E. Tretyakov *et al.*. Spectral composition of radiation of supersonic CW chemical lasers: an HF laser[J]. *Opt. Spectrosc.*, 2002, **93**(6): 947~954
- 11 R. A. Chodzko. Power extraction in CW HF/DF chemical laser[C]. Proceedings of the International Conference on Laser'85 Las Vegas, 1985. 629~640