

文章编号: 0258-7025(2010)09-2424-04

电激励泛频 HF 化学激光器的实验研究

周 琼 袁圣付 罗 威 王红岩 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 以一台电激励连续波 HF 化学激光器作为研究平台, 根据振荡阈值条件和 Rigrod 理论, 并参考国外泛频 HF 激光器的腔镜参数, 选取了适当的膜层反射率, 最后使用镀有波段选择性膜的泛频腔镜进行了实验。光轴取在 H₂ 喷注孔下游 1 mm 处, 得到了 3.5 W 的泛频 HF 激光, 泛频效率为 10%, 谱线成分为 P₂₀(6) 和 P₂₀(7); 60 cm 处的光斑尺寸为 10 mm×7 mm, 激光模式为 TEM₀₀。实现泛频输出的同时伴有少量的基频输出, 主要是因为镜面膜层质量的限制, 而镀膜的技术水平也是目前研究泛频 HF 激光器的主要难点之一。另外, 在泛频出光的重复性实验中仅获得瓦级的基频输出, 谱线成分为 P₂(3) 和 P₂(4), 主要原因为腔镜膜层的退化。

关键词 激光器; 电激励 HF 激光器; 泛频; 腔镜; 镜面膜层; 膜层退化

中图分类号 TN248.5; O437 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2424

Experiment Study of a Discharge-Driving HF Overtone Chemical Laser

Zhou Qiong Yuan Shengfu Luo Wei Wang Hongyan Jiang Zongfu

(College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Working on a discharge-driving continuous wave (CW) HF chemical laser, using the oscillating threshold condition and Rigrod theory, and considering with the data of overseas' HF overtone chemical laser, the overtone cavity mirrors with band selectivity coating were chosen to study. 3.5 W of overtone laser is obtained on the 1mm downstream station of H₂ injecting orifices. The spot size at 60 cm distance is about 10 mm×7 mm, and the overtone efficiency is 10%. The spectra contain lines P₂₀(6) and P₂₀(7), and the mode is TEM₀₀. There is a little of fundamental laser going with overtone laser. The analysis of results indicates that this is mostly because of the bad coating of mirrors, which is also one of the difficulties to obtain the HF overtone laser, recently. When studying this experiment again, the laser only obtains many watts of fundamental power, the spectra contain lines P₂(3) and P₂(4). And the possibility reason is optical coating degradation of resonator mirrors.

Key words lasers; discharge-driving HF chemical laser; overtone; cavity mirror; coating of mirrors; degradation of coating

1 引 言

泛频 HF 化学激光器于 20 世纪 80 年代中期在美国研制成功, 输出波长为 1300~1500 nm, 比基频 (2600~3100 nm) 短了约一半, 处于近红外波段, 且部分谱线处于大气窗口, 有良好的大气传输性能^[1,2]。此外, HF 化学激光器能够实现的反转粒子数密度 ΔN_{20} 较高, 容易实现泛频激光^[3], 且其泛频增益 g_{20} 可以达到较高的水平, 相比于与其他的激

光体系如 DF, CO 分子等, 更易实现高功率的泛频输出, 因此, 泛频 HF 化学激光器在新型的高能激光武器研究等领域一直保持着较高的地位。

对电激励泛频 HF 化学激光器而言, 一般仅能实现小功率输出, 但其在泛频小信号增益系数的测量、大气传输性能的研究以及如何提高泛频效率等方面能提供有效的激光光源。特别是电激励泛频 HF 化学激光器在光腔参数选取和膜层筛选等方面

收稿日期: 2010-03-29; 收到修改稿日期: 2010-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(10304025)资助课题。

作者简介: 周 琼(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事中红外化学激光方面的研究。E-mail: qinqin0416@hotmail.com

导师简介: 姜宗福(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术及气动光学等方面的研究。

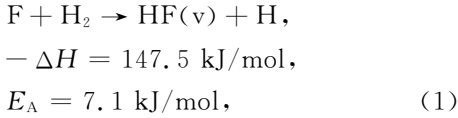
E-mail: jiangzongfu@yahoo.com.cn

的研究,对实现燃烧驱动泛频 HF 化学激光器的大功率输出有较大的指导意义。

本文使用镀有特殊膜层的泛频腔镜,在已有的电激励连续波 HF 化学激光器上,成功地实现了泛频出光,并对泛频 HF 激光的出光结果进行了分析研究。

2 膜层参数的选择

电激励 HF 化学激光器中的化学抽运反应为



式中 $-\Delta H$ 和 E_{A} 分别为反应热和活化能。化学反应产生的总资用能 $E_{\text{tot}}(-\Delta H + E_{\text{A}} = 154.6 \text{ kJ/mol})$, 可以将 $\text{HF}(\text{v}, \text{J})$ 分子抽运到振动态 $v \leq 3$ 的能级高度, 并发生 $\Delta v \geq 2$ 的泛频跃迁 ($v=3 \rightarrow v=1, v=3 \rightarrow v=0, v=2 \rightarrow v=0$), 而 $\text{HF}(3, \text{J})$ 分子会发生快速的弛豫, 因此在激光器中仅考虑 $v=2 \rightarrow v=0$ 的泛频跃迁, 而激光器中大量存在的是基频跃迁 ($\Delta v=1$), 这两者之间对激发态的 HF 分子存在激烈的竞争, 通过分析泛频激光和基频激光在小信号增益系数 g_0 方面的关系, 可以直观地理解实现 HF 化学激光器的泛频输出的困难所在。

增益系数主要由两个因素决定: 反转粒子数密度 ΔN 和发射截面 $\sigma(\nu_0)$ 。在亚音速情况下可以假设增益介质是纯多普勒加宽的, 因此可以得到

$$\frac{g_0^{\text{OT}}}{g_0^{\text{FUND}}} = \frac{\Delta N_{\text{OT}}}{\Delta N_{\text{FUND}}} \frac{\sigma_{\text{v,J}}^{\text{OT}}(\nu_0)}{\sigma_{\text{v,J}}^{\text{FUND}}(\nu_0)} = \frac{\Delta N_{\text{OT}}}{\Delta N_{\text{FUND}}} \frac{\lambda_{\text{OT}}^3 A_{20}}{\lambda_{\text{FUND}}^3 A_{10,21}}, \quad (2)$$

式中 A 为爱因斯坦系数。仅从数量级角度考虑, 基频激光的小信号增益系数比泛频激光高了 $1 \sim 2$ 个数量级, 要想实现泛频激光, 首先就要抑制基频的振荡放大。

要在谐振腔内实现激光的振荡放大, 必须满足阈值条件

$$g \geq g_{\text{th}} = -\frac{1}{2L_e} \ln(R_1 R_2), \quad (3)$$

式中 g_{th} 为低光腔损耗条件下的增益系数阈值, R_1, R_2 为腔镜反射率。对 HF 化学激光器来说, 在增益区长度 L_e 确定的情况下, 可以将基频增益系数阈值 $g_{\text{th}}^{\text{FUND}}$

提到一个较高的值, 同时降低泛频的增益系数阈值 $g_{\text{th}}^{\text{OT}}$, 从而抑制基频振荡, 并实现泛频激光。

综上所述, 要实现 HF 化学激光器的泛频输出, 关键在于在激光器腔镜上镀膜选择选择性膜, 该膜应该具有对泛频波段高反、对基频波段高透的基本特性。该膜层在泛频波段的反射率 R_1 和 R_2 需满足

$$\exp(2g_0^{\text{OT}} L_e - \delta) R_1 R_2 \geq 1, \quad (4)$$

在基频波段的反射率 R'_1 和 R'_2 则需满足

$$\exp(2g_0^{\text{FUND}} L_e - \delta) R'_1 R'_2 < 1, \quad (5)$$

而在镀膜技术允许的条件下应使基频波段的反射率越小越好。

由于泛频 HF 激光器的腔镜必须具有抑制基频的性质, 借鉴 Rigrod 理论^[4], 估计激光器的基频增益系数范围为 $0.04 \sim 0.055 \text{ cm}^{-1}$, 参考国外泛频 HF 化学激光器的相关腔镜参数^[5~8], 对膜层的反射率参数提出如下要求: 全反镜为在泛频波段反射率 $R_1 > 99\%$, 基频波段反射率 $R'_1 < 2\%$; 输出耦合镜在泛频波段反射率 $R_2 \approx 98\%$, 基频波段反射率 $R'_2 < 2\%$, 并委托华北光电技术研究所来制作实验所用的腔镜。

3 实 验

3.1 实验前期准备

激光器采用凹-凹稳定腔结构, 腔长为 92 cm , 两面腔镜均为平-凹镜, 尺寸为 $\phi 35 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 其中在凹面镀有波段选择性膜层。

考虑到膜层在基频波段的反射率是不均匀的, 对各支谱线的抑制能力也会不一样, 选择实验气流参数时要让各支基频谱线的增益都保持在一个较低的水平, 所以将气流参数调节到一个较低的值, 从而减小基频出光^[9]。实验时激光器典型的运转参数和泛频输出特性见表 1(此时, 高压恒流电源的输出电流维持在 1.5 A 附近, 电压控制在 $8 \sim 9 \text{ kV}$)。在这个气体流量配比下, 使用透射率为 15% 的基频输出镜时, 激光器输出光功率为 35 W , 此时基频的增益并不是很高^[10], 而对泛频 HF 激光器来说, 这样的情况则可以减小基频跃迁对粒子数的竞争优势, 有利于实现泛频激光。

表 1 HF 泛频激光器的运转参数和输出特性

Table 1 Operating parameters and output characteristics of HF overtone laser

L / cm	P / kPa	Flow rate / (mmol/s)				Spot size / cm^2	Power / W	Overtone efficiency / %
		H_2	NF_3	main He	secondary He			
92	0.4	22.545	5.357	26.321	31.585	0.7	3.5	10

由于 HF(v, J) 分子的泛频增益很小, 在实验中要保持激光器光腔内的低腔压, 以减少弛豫和去激活效应。另外, 实验对光腔的要求较高, 在进行调腔前, 需要精准地确定基准轴, 这是保证激光器能顺利实现泛频出光的前提条件。

3.2 泛频 HF 出光实验

在不同位置的光轴处进行了实验, 当光轴取在距 H_2 的喷注孔下游 1 mm 处时, 实现了电激励 HF 化学激光器的泛频出光, 在距输出镜 60 cm 处的光斑大小为 $10 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$, 输出激光为 TEM_{00} 模, 其热敏纸的烧灼光斑如图 1 所示。输出功率为 3.5 W, 泛频效率为 10%, 光谱成分包括 $P_{20}(6)$ 和 $P_{20}(7)$, 如图 2 所示。

激光器在实现泛频输出的同时, 在腔镜的两端均发现有基频光, 在高反镜端其功率为 0.3 W, 输出镜端功率为 0.4 W, 光谱仪的扫描结果如图 3 所示。

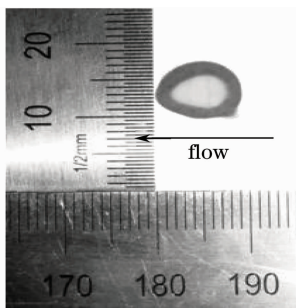


图 1 泛频 HF 激光光斑图

Fig. 1 Facula of HF overtone laser

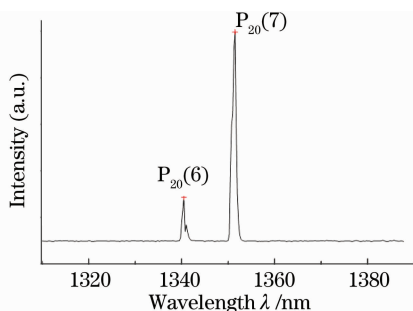


图 2 1 mm 处的泛频谱线

Fig. 2 Overtone spectra at 1mm downstream station of H_2 injecting orifices

激光器输出的泛频谱线仅为 $P_{20}(6)$ 和 $P_{20}(7)$ 两支, 并不是很丰富, 这是由于泛频增益较小, 而增益介质对各支谱线增益放大有不均匀性, 使得在相同的腔镜条件下, 只有高增益的谱线才会实现激射, 由此可见激光器内这两支谱线的增益是比较强的, 腔镜所镀膜层满足了泛频激射的条件。

同时, 从图 3 中看到, 光谱仪在基频波段得到五支谱线, 图中只标明了三支基频谱线即 $P_2(1), P_2(3)$

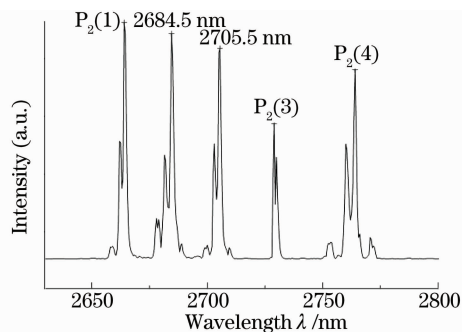


图 3 1 mm 处实现泛频出光时的基频谱线

Fig. 3 Fundamental spectra at 1mm downstream station of H_2 injecting orifices when overtone lasing

和 $P_2(4)$, 这是由于另外两支谱线即 2684.5, 2705.5 nm 正好处于两支泛频谱线的两倍波长附近, 而实验中使用的机械扫描式光栅光谱仪, 其谱线结果应满足光栅方程 $d(\sin \theta + \sin \varphi) = m\lambda_0$ ($m = \pm 1, \pm 2, \dots, \theta$ 为入射角, φ 为出射角), 对于扫描结果中出现的高阶次谱线 $\lambda = m\lambda_0$ ($m \neq \pm 1$), 不能准确地判断是否真的存在这支谱线, 同时, 实验得到的扫描结果中还有一支谱线处于 $P_2(2)$ ($\lambda = 2696.3 \text{ nm}$) 附近, 所以, 并不能简单地区分这两支谱线是泛频的高倍次谱线还是基频谱线, 但是可以肯定的是泛频实验中输出的激光是含有基频成分的。

在相关文献中并没有提到过泛频激光和基频激光同时出现的情况, 本文认为出现这种现象可能是由腔镜镀膜对基频波段光的透射率不均匀性、增益介质对各支谱线增益的不均匀性以及光轴位置的选取三者的综合因素造成的。全反镜对 $P_{20}(6)$ 和 $P_{20}(7)$ 的反射率接近 1, 输出镜对 $P_{20}(6)$ 和 $P_{20}(7)$ 的反射率分别为 98.9% 和 99.0%, 其增益阈值为 $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$, 而由 Rigrod 功率提取理论^[4] 得到激光器泛频增益系数的范围为 $4 \times 10^{-4} \sim 5.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$, 是满足振荡阈值条件的, 因此能够实现激光器的 HF 泛频出光。而 $P_2(1) \sim P_2(4)$ 得到了一定量的输出, 可以判断在 1 mm 处 $P_2(1) \sim P_2(4)$ 的增益是很高的, 对于如此高的基频增益, 腔镜镀的多层膜很难满足抑制基频振荡的条件, 至少没能有效地抑制住这几支高增益基频谱线的激射。

理论上, 在基频激射的情况下是很难再实现 HF 分子的泛频激射的, 但是对本实验而言, 激光器的泛频增益足够大, 腔镜条件也满足了促进泛频激射的条件, 而且对于这几支谱线的基频和泛频激光而言, 它们满足跃迁的转动上能级是不一样的, 相对来说竞争会小些, 因此在实现 HF 泛频出光的同时有基频输出。当然, 这个推测还需要进一步论证。

3.3 腔镜的膜层退化

这台电激励 HF 化学激光器在 1 mm 光轴处实现了泛频出光,但在随后进行的实验中没有实现泛频出光,反而在相同的气、电和光腔条件下有 3 W 左右的基频光出现,光谱成分包括 $P_2(3)$ 和 $P_2(4)$,如图 4 所示,也就是说,泛频出光的重复性不好。

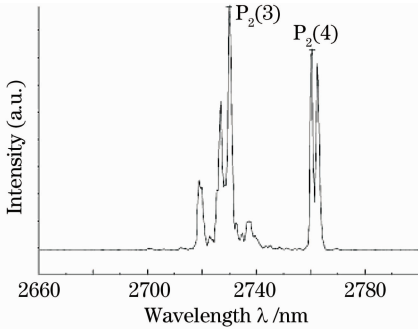


图 4 1 mm 光轴处的基频谱线

Fig. 4 Fundamental spectra at 1mm downstream station of H_2 injecting orifices

无法重复实现泛频 HF 出光主要是由于腔镜所镀膜层的退化。虽然为了保护腔镜,在光腔的两端都吹了 N_2 ,但是实验结束后发现,腐蚀性气体和灰尘等仍会对膜层造成一定损伤,图 5 为全反镜在膜层退化前后的基频波段透射率曲线。从图上可以看到,腔镜对基频波段的透射率极小值甚至降到了 90% 以下,可能是由于膜层吸收损耗的增大或是反射率的增加造成的。损耗的增大对泛频激光的影响要远大于基频激光;而反射率的增加则会使基频的增益阈值 g_{th}^{FUND} 下降,易于实现基频激光,二者均严重影响了激光器内增益介质的泛频振荡,因此也难以在随后的实验中重复实现 HF 泛频出光。

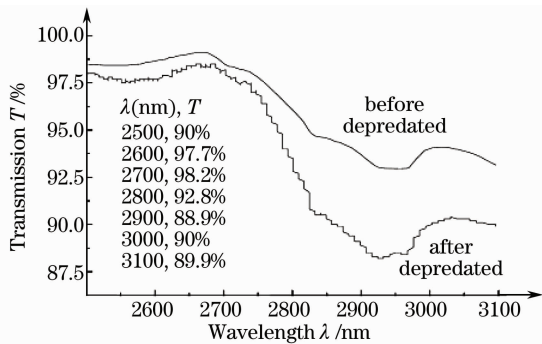


图 5 全反镜膜层退化前后的透射率曲线

Fig. 5 Transmission of high reflector after the coating was depredated

此外,这台激光器最佳运转状态下的基频输出功率为 100 W,而实验中激光器是工作在仅实现 35 W 基频输出的状态下的,况且,在工作一段时间

以后,激光器本身的性能也会下降,这可能也会对重复实现泛频出光带来一定的影响。

4 结 论

结合激光器的实际情况,选取了适当参数的腔镜膜层,实现了电激励连续波 HF 化学激光器的泛频出光,并提出了一套泛频 HF 化学激光器腔镜参数选取的研究方法和思路,HF 泛频的成功出光证明这套方法和思路的可行性。实验中,观察到了 HF 化学激光器泛频与基频同时出光的现象,另外,对实验完的腔镜进行检测,发现存在严重的腔镜膜层退化问题,这都为以后的泛频 HF 化学激光器的实验研究积累了相应的经验,随着研究的进一步深入,预计可以为 1300~1500 nm 波段的相关应用研究提供可靠的激光光源。

参 考 文 献

- R. W. F. Gross, J. F. Bott. Handbook of Chemical Lasers [M]. Yin Houming Transl. Beijing: Science Press, 1987
- R. W. F. 格罗斯, J. F. 博特. 化学激光手册[M]. 尹厚明译. 北京: 科学出版社, 1987
- Zhuang Qi, Sang Fengting, Zhou Dazheng. Short Wavelength Chemical Laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997
- 庄 琦, 桑凤亭, 周大正. 短波长化学激光[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997
- W. Q. Jeffers. Short wavelength chemical lasers[J]. AIAA Journal, 1989, 27(1): 64~66
- W. W. Rigrod. Saturation effects in high-gain lasers[J]. J. Appl. Phys., 1965, 36(8): 2487~2490
- Charles F. Wisniewski, Gerald C. Manke II, Gordon D. Hager et al.. Tunable diode laser gain measurements of the HF(2-0) overtone transitions in a small scale HF laser[C]. AIAA 33 rd plasmadynamics and Lasers Conference, 2002, 2267: 1~10
- David Louis Favot, Jeff Sollee. Improved coating for HF overtone lasers[C]. SPIE, 1992, 1628: 197~207
- Lee H. Sentman, David L. Carroll, Panagiotis T. Theodoropoulos et al.. CW HF overtone chemical laser [C]. SPIE, 1995, 2502: 365~374
- Bruce R. Graves, William A. Duncan, Stanley P. Patterson. HF overtone chemical laser technology [C]. SPIE, 1996, 272: 357~367
- 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. Laser, 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
- Li Lan, Hua Weihong, Yuan Shengfu et al.. Theoretical investigation of nozzle helium film injection at the converge section in CW DF/HF chemical laser[J]. Chinese J. Lasers, 2009, 36(2): 362~366
- 李 兰, 华卫红, 袁圣付等. 连续波 DF/HF 化学激光器收缩段氦气膜注入式新型喷管的理论研究[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 362~366